Nuove ipotesi sull'origine della vita

Le Scienze

Ottobre 2017

€ 4,50

www.lescienze.it

edizione italiana di Scientific American

L'era delle onde gravitazionali

Le prime osservazioni dirette delle increspature dello spazio-tempo aprono una nuova finestra sui misteri del cosmo

Agricoltura

Come sfruttare la comunicazione tra piante e microrganismi

Archeologia

La fine violenta delle civiltà mediterranee dell'Età del bronzo

POSTE ITALIANE SPED. IN A.P. - D.L. 353/2003 CONV. L. 46/2004, ART. 1, C. 1, DCB - ROMA
RIVISTA MENSILE - NUMERO 590 - 3 OTTOBRE 2017

codice EDIZIONI

DAL CATALOGO DI CODICE EDIZIONI

AMIR ALEXANDER

INFINITAMENTE PICCOLI

pp. 400 | euro 26,90

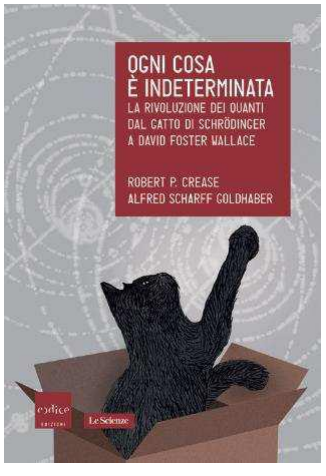
LA STORIA DEL CONCETTO MATEMATICO CHE NELL'EUROPA DELLA CONTRORIFORMA CONTRIBUÌ A SCUOTERE ALLE FONDAMENTA L'ORDINE SOCIALE E POLITICO VIGENTE.

CALEB SCHARF

IL COMPLESSO DI COPERNICO

pp. 264 | euro 19,90

LA PIÙ AVANZATE FRONTIERE DELLA RICERCA SCIENTIFICA RISPONDONO A UNA DELLE DOMANDE PIÙ ANTICHE DELL'UOMO: SIAMO DAVVERO SOLI NELL'UNIVERSO?

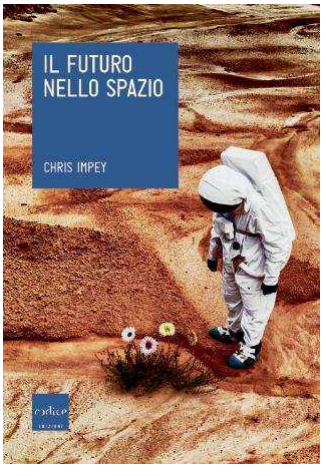


ROBERT CREASE, ALFRED GOLDHABER

OGNI COSA È INDETERMINATA

pp. 336 | euro 21,90

L'INASPETTATO IMPATTO DELLA MECCANICA QUANTISTICA NEI PIÙ DISPARATI CAMPI DEL SAPERE E NELLA VITA QUOTIDIANA: DA UPDIKE AI SIMPSON, DALLA FILOSOFIA AL JAZZ.



CHRIS IMPEY

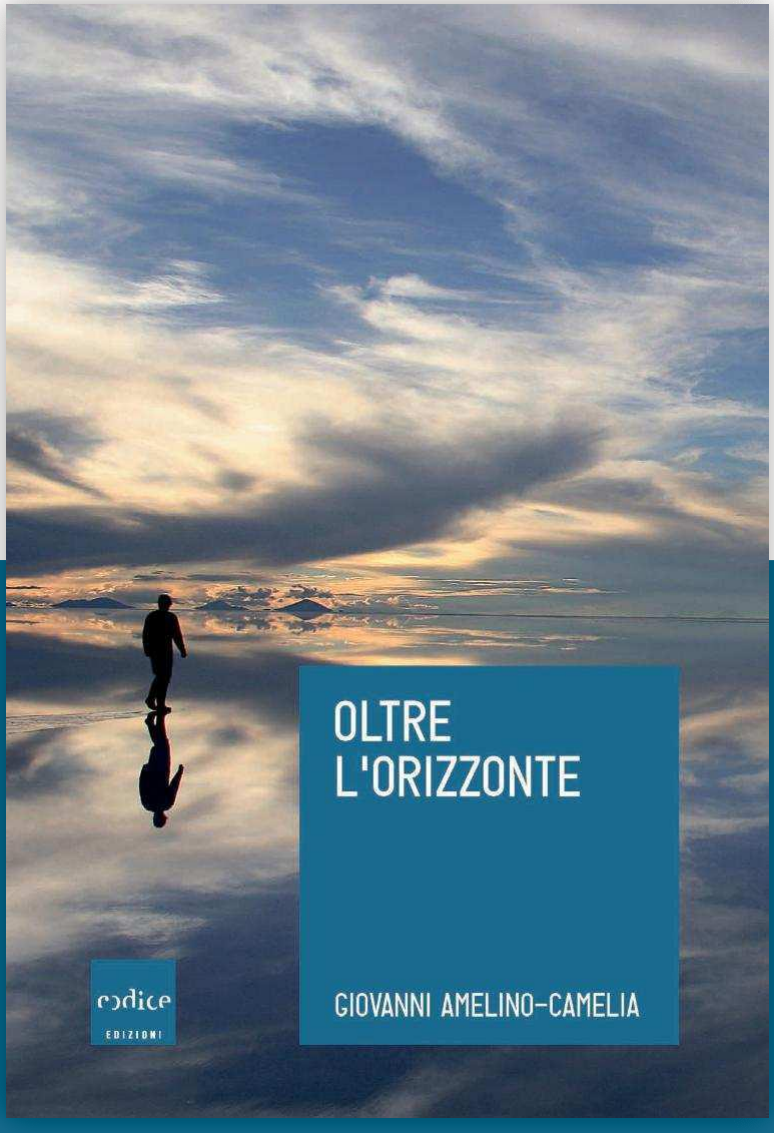
IL FUTURO NELLO SPAZIO

pp. 320 | euro 23,00

IL LIBRO IN CUI LA SAGGISTICA SCIENTIFICA INCONTRA STAR TREK. LO SPAZIO COME ULTIMA FRONTIERA DEL BISOGNO DELL'UOMO DI ESPLORARE E VIAGGIARE.

facebook.com/codiceedizioni
twitter.com/codiceedizioni
pinterest.com/codiceedizioni

info@codiceedizioni.it | codiceedizioni.it



IN LIBRERIA
DAL 26 OTTOBRE

GIOVANNI AMELINO-CAMELIA

OLTRE L'ORIZZONTE

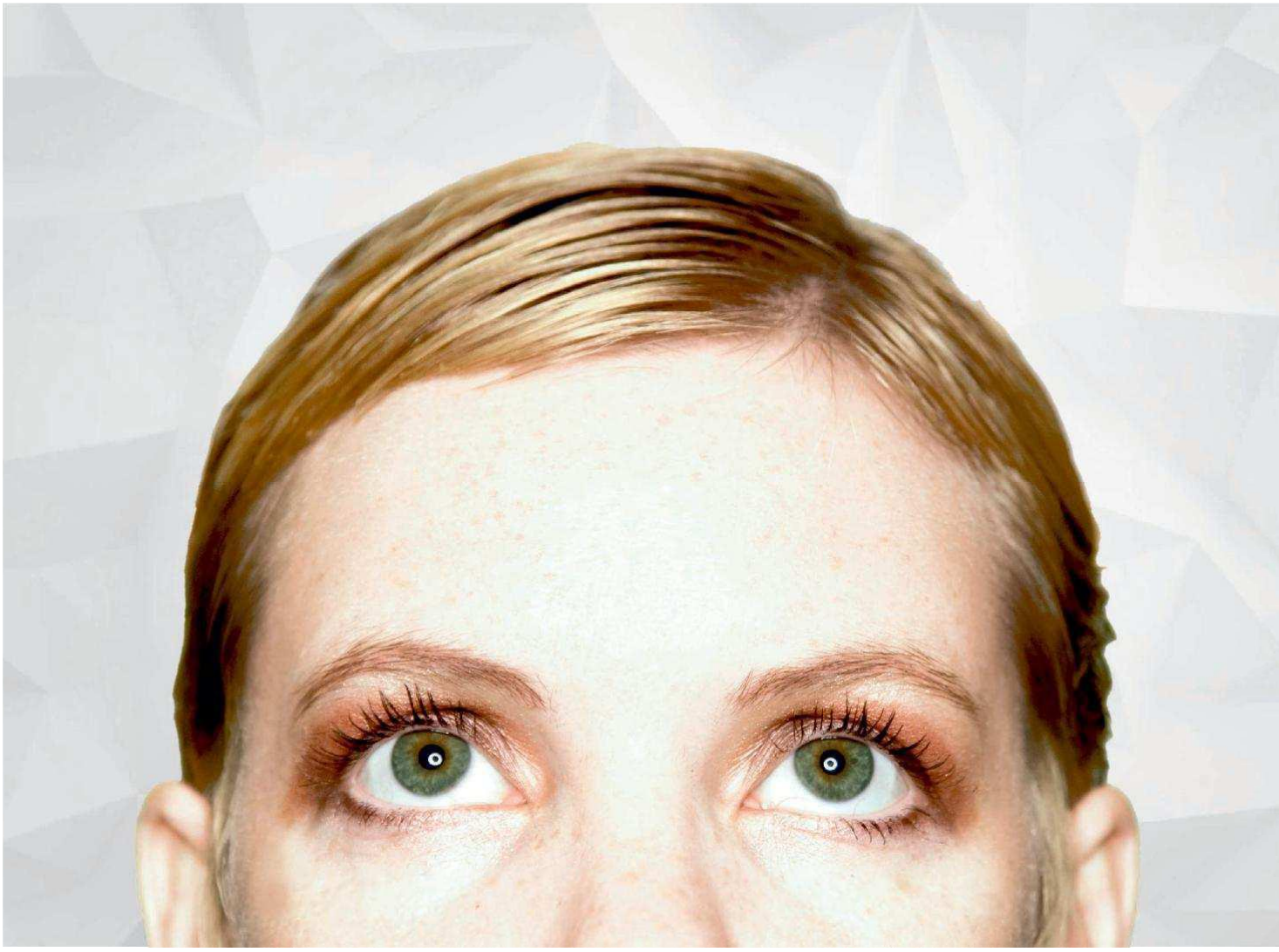
pp. 166 | euro 16,00

«COSA INTENDONO I SOSTENITORI DI UNA "TEORIA DEL TUTTO"? CHE SI ARRIVERÀ AL PUNTO IN CUI LA SCIENZA NON PROVERÀ PIÙ A CONQUISTARE NUOVI ORIZZONTI? ALCUNI PARLANO DEL "SOGNO DI UNA TEORIA FINALE", MA PER ME QUEL SOGNO È UN INCUBO».

GIOVANNI AMELINO-CAMELIA

UN LIBRO SULLO STRAORDINARIO LAVORO DI ALBERT EINSTEIN. UN LIBRO CHE È ANCHE UN ATTO D'AMORE NEI CONFRONTI DEL PENSIERO SCIENTIFICO, CAPACE DI ALIMENTARE LO STUPORE CON CUI L'UOMO SFIDA L'ORIZZONTE DEL PROPRIO SAPERE.

codice
EDIZIONI



Women are underrepresented in academic leadership positions. And yet there is a lack of adequate instruments available to help find suitable, excellent women researchers quickly.

AcademiaNet is a database containing the profiles of over 2,400 outstanding women researchers from all disciplines.

The aim of our search portal is to make it easier to find female academics to fill leading positions and to sit on executive committees.

The partners

Robert Bosch Stiftung

Spektrum der Wissenschaft

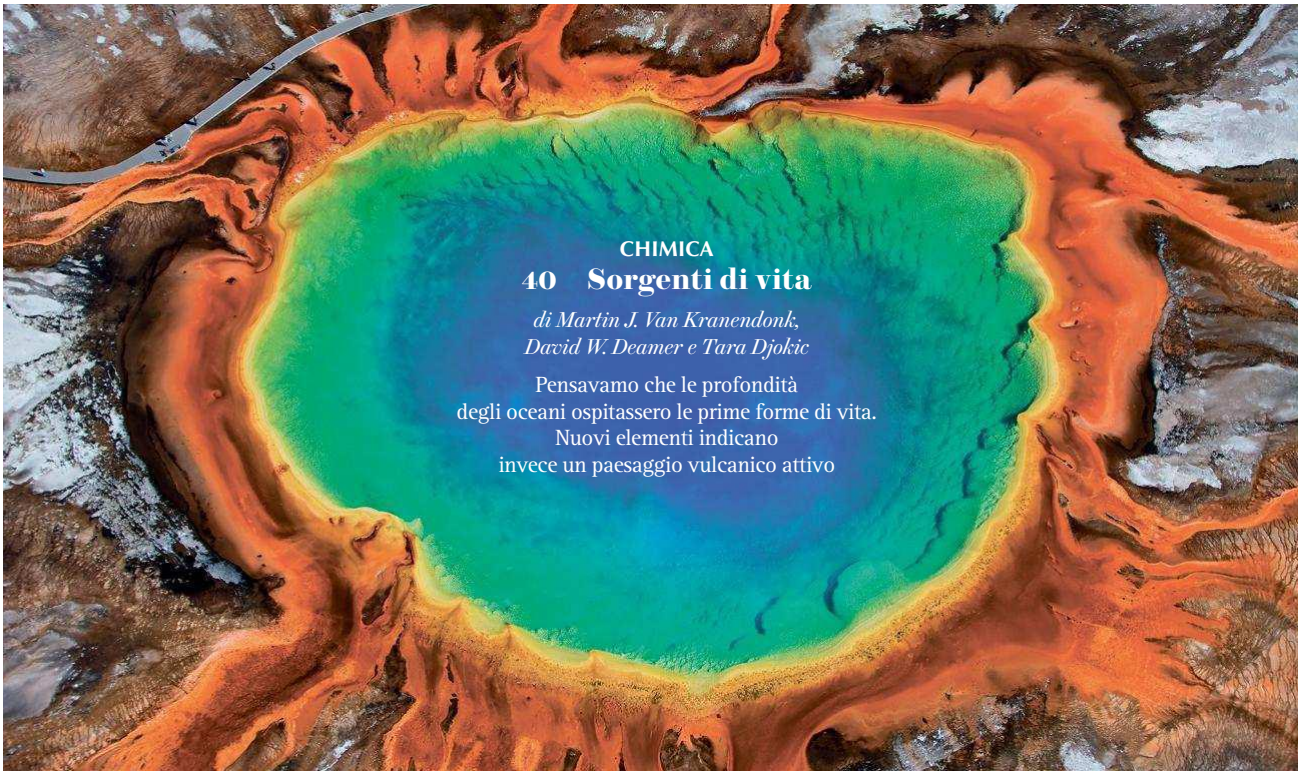
nature

IN COPERTINA

La rilevazione delle onde gravitazionali è uno strumento potente per gli astronomi, e potrebbe anche risolvere un problema cruciale della fisica: l'unificazione di relatività generale e meccanica quantistica. (Simulating eXtreme Spacetimes)

Sommario

ottobre 2017 numero 590



CHIMICA

40 Sorgenti di vita

di Martin J. Van Kranendonk, David W. Deamer e Tara Djokic

Pensavamo che le profondità degli oceani ospitassero le prime forme di vita. Nuovi elementi indicano invece un paesaggio vulcanico attivo

ASTRONOMIA

30 L'era delle onde gravitazionali

di Giovanni Losurdo e Fulvio Ricci

La prima rilevazione diretta delle increspature dello spazio-tempo previste oltre cent'anni fa da Albert Einstein ha aperto le porte a una nuova era per la conoscenza dell'universo

INTERVISTA

38 Il cacciatore di onde

di Giulia Alice Fornaro

La prima rilevazione di onde gravitazionali ha una lunga storia, e Kip Thorne è uno dei protagonisti principali

MEDICINA

48 Operazione diabete

di Francesco Rubino

Interventi chirurgici per l'apparato gastrointestinale liberano dal diabete, e nuove prove mostrano che l'intestino, non solo l'insulina, potrebbe essere responsabile della malattia

AGRICOLTURA

54 Costruire un raccolto migliore

di Marla Broadfoot

Gli scienziati stanno imparando a manipolare le complesse conversazioni che le piante hanno con microrganismi, parassiti, nutrienti e altri elementi del fitobioma per evitare una carestia futura

PALEOANTROPOLOGIA

62 Nostro cugino Neo

di Kate Wong

Uno scheletro notevolmente completo, e finalmente una datazione, per il misterioso *Homo naledi*

PSICOLOGIA

64 Dialoghi con se stessi

di Charles Fernyhough

Le ricerche sulle conversazioni che abbiamo con noi stessi aprono una finestra sui meccanismi nascosti della mente umana

CONSERVAZIONE AMBIENTALE

70 Requiem per la vaquita

di David Schmale e Shane Rossdi Erik Vance

Che cosa insegna la scomparsa di una piccola focena messicana sulle estinzioni nel XXI secolo

ARCHEOLOGIA

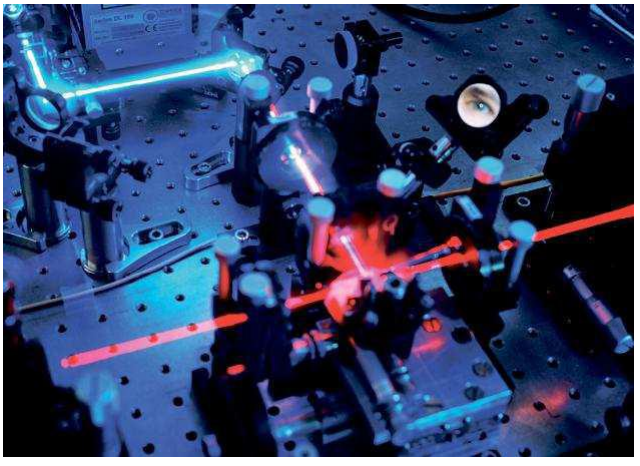
80 Collasso di culture

di Josef Fischer

I possenti palazzi della Grecia micenea furono distrutti da incendi, i villaggi furono devastati, intere regioni furono spopolate. Benché i funzionari dei palazzi registrassero fino alla fine il loro lavoro, le ragioni del brusco declino rimangono un mistero

Werner Van Steen/Getty Images

Sommario



17

19

91

Rubriche

9 **Editoriale**
di Marco Cattaneo

10 **Anteprima**

11 **Lavori in corso**

12 **Intervista**
Un nuovo messaggero immunitario *di Anna Rita Longo*

14 **Made in Italy**
Una nuvola per l'edilizia *di Letizia Gabaglio*

16 **Scienza e filosofia**
Il motore dell'ignoranza *di Telmo Pievani*

17 **Appunti di laboratorio**
Esperimenti sull'idea di causalità *di Edoardo Boncinelli*

18 **Il matematico impertinente**
Due più due fa cinque *di Piergiorgio Odifreddi*

19 **La finestra di Keplero**
Quarant'anni di Voyager *di Amedeo Balbi*

20 **Homo sapiens**
Eccessi di Creta *di Giorgio Manzi*

88 **Coordinate**
Morti da oppioidi *di Mark Fischetti*

89 **Povera scienza**
Il più grande avvelenatore di sempre *di Paolo Attivissimo*

90 **La ceretta di Occam**
Un test per la qualunque *di Beatrice Mautino*

91 **Pentole & provette**
Bistecca a rovescio *di Dario Bressanini*

92 **Rudi matematici**
Accrocchi inappendibili
di Rodolfo Clerico, Piero Fabbri e Francesca Ortenzio

94 **Libri & tempo libero**

SCIENZA NEWS

21 Malattie che cambiano con il clima
22 Un universo meno concentrato
22 Dubbi sulle supernove come candele standard
23 Dialoghi tra raggi di luce
23 Le impronte digitali dell'antimateria
24 Un clima mai visto prima
24 Il primo esperimento di riscaldamento degli oceani
26 L'antenato di tutti i fiori
26 Le origini della omeotermia
27 Agli inizi della fotosintesi delle piante
27 Zuccheri sotto ghiaccio, precursori della vita
28 Brevissime

Volker Steger/SPL/AGF (*fasci laser*); cortesia NASA/JPL-Caltech (*Voyager*); 4kodiak/iStock (*bistecca*)

CHI INVESTE IN PUBBLICITÀ SU STAMPA, HA MOLTO PIÙ DI UN RITORNO D'IMMAGINE.

OGNI INVESTIMENTO PUBBLICITARIO IN PIÙ SU CARTA STAMPATA TI DÀ DIRITTO A UN CREDITO D'IMPOSTA FINO AL 75% DEI COSTI SOSTENUTI*.

La pubblicità su stampa quotidiana e periodica non dà solo grande visibilità al tuo business, ma un vantaggio economico rilevante. Oggi, infatti, se investi almeno l'1% in più rispetto all'anno precedente, potrai godere di un credito d'imposta fino al 75% sul costo degli investimenti incrementali. Una percentuale che sale fino al 90% per PMI e Start-up, e che puoi utilizzare per saldare contributi erariali o Inps.

*art. 57-bis D.L. n. 50/2017, conv. in legge, con modificazioni, dalla L. n. 96/2017.

FIEG

FEDERAZIONE ITALIANA EDITORI GIORNALI

Y&R

Oggi puoi leggere Le Scienze e Mente&Cervello direttamente su PC.

Sfoglia le Scienze online.

I migliori approfondimenti su scienza, tecnologia e innovazione. Scegli l'abbonamento che preferisci e leggi la rivista comodamente a casa sul tuo PC. Inoltre su App Store è disponibile l'app de Le Scienze per iPad. Scopri le offerte su **http://s.lescienze.it/offerte**

Le Scienze

di Marco Cattaneo

Un Nobel annunciato?

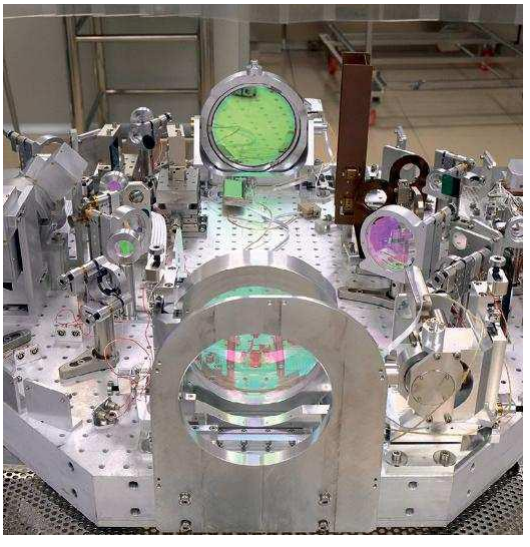
Inizia una nuova epoca per l'astronomia osservativa

L'11 febbraio 2016 le collaborazioni LIGO e Virgo annunciavano la prima osservazione diretta delle onde gravitazionali. Previste dalla teoria generale della relatività di Einstein esattamente un secolo prima, erano state inseguite per decenni senza successo dai fisici di mezzo mondo. Prima con i rivelatori a barra, poi – dall'inizio del secolo – con i tre grandi interferometri costruiti negli Stati Uniti e in Italia. (Nel frattempo la prova indiretta dell'esistenza delle onde gravitazionali era arrivata a metà degli anni settanta con le osservazioni della pulsar binaria PSR B1913+16 da parte degli statunitensi Russell Hulse e Joseph Taylor, insigniti del Nobel per la fisica nel 1993.)

Ma nei primi anni di funzionamento anche questi formidabili progetti avevano fallito l'obiettivo. Ci sono voluti cinque anni di lavoro per migliorare la sensibilità dei rivelatori, finché nel settembre 2015, poco dopo la riaccensione, i due interferometri di Advanced LIGO hanno registrato il primo segnale. Avevano catturato le onde gravitazionali generate dalla fusione di due buchi neri distanti 1,3 miliardi di anni luce da noi.

A quella prima osservazione ne sono seguite altre due confermate e una non confermata, sempre riferite alla fusione di buchi neri molto distanti. Ma altre potrebbero essere presto in arrivo, e sarebbero una novità. Almeno a giudicare dai *rumors* che il settimanale britannico «New Scientist» ha pubblicato in rete il 23 agosto, accennando alla rivelazione di onde gravitazionali prodotte dalla collisione di due stelle di neutroni in una galassia ellittica a qualche centinaio di milioni di anni luce di distanza.

Sia come sia, il progredire delle osservazioni ricorda in qualche modo la scoperta dei pianeti extrasolari. Dopo che ne fu annunciata per la prima volta la scoperta, quasi trent'anni fa, le osservazioni si sono susseguite sempre più rapidamente, anche grazie a nuovi strumenti come il telescopio spaziale Kepler, e oggi ormai si contano più di 3500 pianeti in orbita intorno ad altre stelle. Certo, non è detto che assisteremo a un diluvio di onde gravitazionali, ma con l'entrata in funzione dei nuovi interferometri KAGRA, in fase di costruzione in Giappone, e il terzo LIGO, in India, si aprirà ufficialmente l'era delle onde gravitazionali, come scrivono Giovanni Losurdo e Fulvio Ricci in queste pagine, un nuovo strumento per studiare il cosmo.



La scoperta delle onde gravitazionali è stata una delle più avvincenti avventure sperimentali degli ultimi decenni, come ci racconta a pagina 38 Kip Thorne, che nel 1984 fondò il progetto LIGO insieme a Rainer Weiss. A proposito, nessuno si stupirebbe se proprio a loro due, il 3 ottobre, fosse assegnato il premio Nobel per la fisica, proprio il giorno in cui questo numero andrà in edicola.

Cortesia LAPP/The Virgo Collaboration

Comitato scientifico

Leslie C. Aiello
presidente, Wenner-Gren Foundation for Anthropological Research

Roberto Battiston
professore ordinario di fisica sperimentale, Università di Trento

Roger Bingham
docente, Center for Brain and Cognition, Università della California a San Diego

Edoardo Boncinelli
docente, Università Vita-Salute San Raffaele, Milano

Arthur Caplan
docente di bioetica, Università della Pennsylvania

Vinton Cerf
Chief Internet Evangelist, Google

George M. Church
direttore, Center for Computational Genetics, Harvard Medical School

Rita Colwell
docente, Università del Maryland a College Park e Johns Hopkins Bloomberg School of Public Health

Richard Dawkins
fondatore e presidente, Richard Dawkins Foundation

Drew Endy
docente di bioingegneria, Stanford University

Ed Felten
direttore, Center for Information Technology Policy, Princeton University

Kaigham J. Gabriel
presidente e CEO, Charles Stark Draper Laboratory

Harold Garner
direttore, divisioni sistemi e informatica medici, docente, Virginia Bioinformatics Institute, Virginia Tech

Michael S. Gazzaniga
direttore, Sage Center for the Study of Mind, Università della California a Santa Barbara

David Gross
docente di fisica teorica, Università della California a Santa Barbara (premio Nobel per la fisica 2004)

Danny Hillis
co-presidente, Applied Minds, LLC

Daniel M. Kammen
direttore, Renewable and Appropriate Energy Laboratory, Università della California a Berkeley

Vinod Khosla
Partner, Khosla Ventures

Christof Koch
docente di biologia cognitiva e comportamentale, California Institute of Technology

Lawrence M. Krauss
direttore, Origins Initiative, Arizona State University

Morten L. Kringelbach
direttore, Hedonia: TrygFonden Research Group, Università di Oxford e Università di Aarhus

Steven Kyle
docente di economia applicata e management, Cornell University

Robert S. Langer
docente, Massachusetts Institute of Technology

Lawrence Lessig
docente, Harvard Law School

John P. Moore
docente di microbiologia e immunologia, Weill Medical College, Cornell University

M. Granger Morgan
docente, Carnegie Mellon University

Miguel Nicolelis
condirettore, Center for Neuroengineering, Duke University

Martin Nowak
direttore, Program for Evolutionary Dynamics, Harvard University

Robert Palazzo
docente di biologia, Rensselaer Polytechnic Institute

Telmo Pievani
professore ordinario filosofia delle scienze biologiche, Università degli Studi di Padova

Carolyn Porco
leader, Cassini Imaging Science Team, e direttore, CICLOPS, Space Science Institute

Vilayanur S. Ramachandran
direttore, Center for Brain and Cognition, Università della California a San Diego

Lisa Randall
docente di fisica, Harvard University

Carlo Alberto Redi
docente di zoologia, Università di Pavia

Martin Rees
docente di cosmologia e astrofisica, Università di Cambridge

John Reganold
docente di scienza del suolo, Washington State University

Jeffrey D. Sachs
direttore, The Earth Institute, Columbia University

Eugenie C. Scott
Founding Executive Director, National Center for Science Education

Terry Sejnowski
docente e direttore del Laboratorio di neurobiologia computazionale, Salk Institute for Biological Studies

Michael Shermer
editore, rivista «Skeptic»

Michael Snyder
docente di genetica, Stanford University School of Medicine

Giorgio Vallortigara
docente di neuroscienze, direttore associato, Centre for Mind/Brain Sciences, Università di Trento

Lene Vestergaard Hau
docente di fisica e fisica applicata, Harvard University

Michael E. Webber
direttore associato, Center for International Energy & Environmental Policy, Università del Texas ad Austin

Steven Weinberg
direttore, gruppo di ricerca teorica, Dipartimento di fisica, University del Texas ad Austin (premio Nobel per la fisica 1979)

George M. Whitesides
docente di chimica e biochimica, Harvard University

Nathan Wolfe
direttore, Global Viral Forecasting Initiative

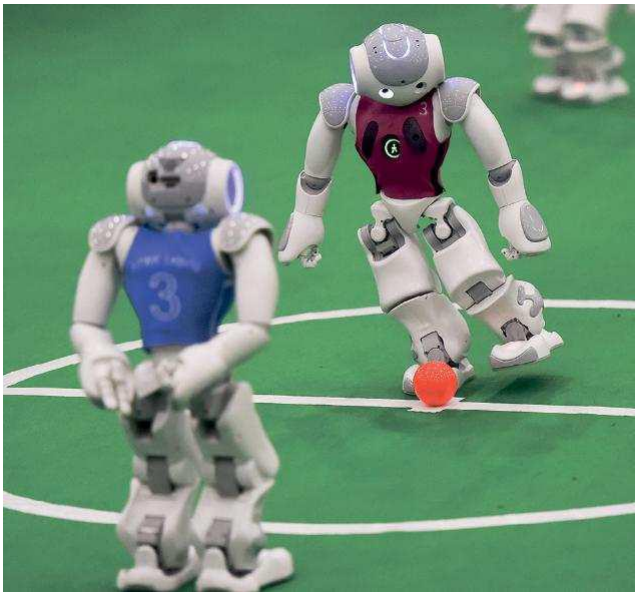
Anton Zeilinger
docente di ottica quantistica, Università di Vienna

Jonathan Zittrain
docente di legge e computer science, Harvard University

L'Italia degli automi

A richiesta con il numero di novembre *Spaghetti robot,* un libro di Riccardo Oldani

Il comune di Peccioli è un piccolo centro non lontano da Pisa. È arroccato su una collina, da cui guarda la Valle dell'Era. Ai piedi del piccolo borgo toscano – conta poco meno di 5000 abitanti – c'è una casa che è un punto di eccellenza mondiale in un settore di ricerca di avanguardia, quello dello sviluppo dei robot. Se infatti Peccioli può fregiarsi del titolo di «città dei robot», il merito è di un accordo tra comune e Scuola superiore Sant'Anna di Pisa grazie a cui è stato aperto un laboratorio, gestito dall'Istituto di biorobotica del Sant'Anna, in una delle case del borgo: la cosiddetta «casa domotica», un luogo in cui testare sistemi che in futuro potrebbero aiutare persone anziane e tenere loro compagnia, e le cui attività si basano anche sulla partecipazione attiva della popolazione locale.



Quella di Peccioli è una della tante realtà della ricerca robotica italiana raccontata in *Spaghetti robot*, libro del giornalista Riccardo Oldani allegato a richiesta con «Le Scienze» di novembre, che nasce da interviste dirette con i protagonisti di questo ambito di ricerca nel nostro paese, che rappresenta un fiore all'occhiello probabilmente sconosciuto ai più.

Nel suo viaggio attraverso la penisola, isole comprese, Oldani, che cura anche un blog dedicato proprio alla robotica sul sito di «Le Scienze», racconta scienziati e ricerche di centri di assoluta eccellenza a livello internazionale. Sono comunità concentrate soprattutto attorno ad alcuni poli, come quello di Pisa e della Scuola superiore Sant'Anna, già citata, quello di Genova, che fa riferimento alla locale università e all'Istituto italiano di tecnologia, quelli di Milano e di Torino, legati ai rispettivi politecnici, quello di Roma, quello di Napoli e quello siciliano, che vede coinvolte l'Università di Catania e l'Università di Palermo, e diversi altri poli, collegati a enti come il Consiglio nazionale delle ricerche e l'ENEA. L'unione e la condivisione di queste competenze danno vita a una comunità scientifica appassionata e con numerose collaborazioni di livello mondiale su progetti di prim'ordine, in molti casi visionari, che tratteggiano un futuro affascinante.

Dimenticate i robot delle catene di montaggio, o meglio, metteteli da parte, perché gli automi a cui lavorano i ricercatori italiani e i loro colleghi di altri paesi vanno ben oltre. Il futuro ci riserva robot di servizio, cioè in grado di muoversi in ambienti frequentati da esseri umani, di interagire con noi, parlare o interpretare i nostri pensieri. I settori di applicazione sono molteplici: dall'assistenza di persone anziane a quella di pazienti con disabilità permanenti, al soccorso in scenari di incidenti industriali o disastri naturali. E ancora, perché no?, robot con cui giocare.

Un futuro del genere porta con sé anche inevitabili questioni etiche e legali, che nel libro sono discusse, insieme alla via tutta italiana alla robotica, caratterizzata da una creatività senza eguali. La nostra non è una ricerca robotica ricca, ma di certo è piena di un'inventiva che le permette di stare alla pari con potenze economiche globali.

Non c'è nulla da temere però. I robot non sostituiranno l'essere umano, ma ne prenderanno il posto in lavori di basso concetto, creandone altri in professioni che serviranno a creare, gestire e mantenere in efficienza la comunità di automi sempre più numerosa che un domani ci accompagnerà nelle nostre vite. Con un pizzico di orgoglio italiano.

RISERVATO AGLI ABBONATI

Gli abbonati possono acquistare i volumi di **La Biblioteca delle Scienze** al prezzo di € 8,40, incluso il prezzo di spedizione, telefonando al numero 199.78.72.78 (0864.256266 per chi chiama da telefoni non abilitati).

La stessa offerta è valida per richiedere i volumi delle collane **I grandi delle scienze a fumetti** e **I manga delle scienze**: in entrambi i casi gli abbonati possono acquistare i volumi al prezzo di € 9,90 incluse le spese di spedizione.
Il costo massimo della telefonata da rete fissa è di 14,37 cent di euro al minuto più 6,24 cent di euro di scatto alla risposta (iva inclusa).
Per chiamate da rete mobile il costo massimo della chiamata è di 48,4 cent di euro al minuto più 15,62 cent di euro di scatto alla risposta (iva inclusa).

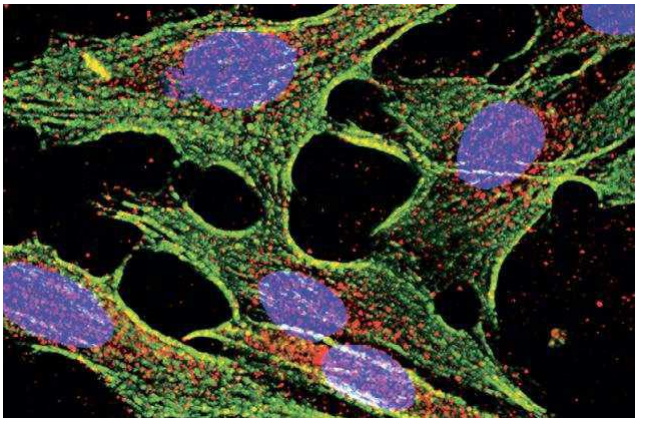
Xinhua/Photoshot/AGF

a cura di Giovanni Spataro

Staminali per il Parkinson

Un esperimento su modelli animali della malattia ha ottenuto risultati promettenti

L'impiego delle cellule staminali è una delle terapie più promettenti per le malattie neurodegenerative, e il morbo di Parkinson, caratterizzato da danni ai neuroni che producono il neurotrasmettitore dopamina, è il banco di prova (si veda *Staminali per il cervello* in «Le Scienze» n. 573, maggio 2016). Un esame importante è stato superato da Jun Takahashi dell'Università di Kyoto e colleghi. Come illustrato su «Nature», gli scienziati hanno trapiantato cellule staminali pluripotenti indotte (iPS) umane nel cervello di macachi, usati come modello animale del Parkinson. Nel cervello delle scimmie, le iPS, ottenute da cellule adulte riportate allo stadio di staminale con specifici protocolli, si sono differenziate in neuroni capaci di produrre dopamina e quindi alleviare il tremore tipico del Parkinson, senza effetti collaterali come tumori o rigetto, sopravvivendo per ben due anni.



A est o a ovest?

Sesto senso. La cannaiola usa il campo geomagnetico per percepire cambiamenti nella declinazione magnetica.

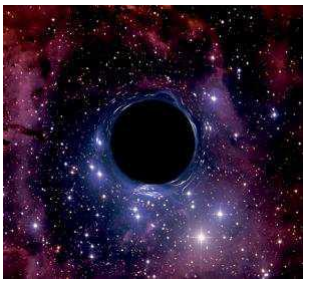
Numerose specie sono in grado di percepire il campo magnetico terrestre per sfruttarlo come una bussola con cui orientarsi negli spostamenti, spesso in grandi migrazioni. Lo studio degli organi e dei processi biochimici coinvolti in questo senso sconosciuto agli esseri umani è però ancora lontano dall'essere completato (si veda *Il senso della bussola* in «Le Scienze» n. 523, marzo 2012), ma nel frattempo si scoprono altre importanti capacità della bussola animale.

Su «Current Biology», Nikita Chernetsov dell'Università di San Pietroburgo e colleghi riferiscono di aver scoperto che la cannaiola, una specie di uccello migratore, non solo sa usare il campo magnetico terrestre per orientarsi nella direzione nord-sud, ma è anche in grado di sfruttare lo stesso campo per capire dove si trova rispetto a un asse est-ovest durante spostamenti su lunghe distanze, ovvero a quale longitudine si trova. La scoperta è stata ottenuta su esemplari selvatici adulti di cannaiole confusi in modo appropriato, cioè tenuti in gabbie equipaggiate con strumenti che potevano modificare su misura il campo magnetico percepito dagli uccelli.

È stata sufficiente una lieve modifica per far credere alle cannaiole di trovarsi a 1450 chilometri di distanza in direzione ovest rispetto a Rybachy, in Russia, dove in effetti si trovavano. Secondo gli autori, gli uccelli esaminati sfruttavano cambiamenti nella declinazione magnetica, ovvero la differenza angolare tra il nord geografico e il nord magnetico, per risolvere il problema della longitudine.

Giganti intermedi

In una nube di gas molecolare vicina al centro della Via Lattea, la nostra galassia, ci sarebbe un buco nero di 100.000 masse solari, cioè un buco nero intermedio. L'annuncio è stato dato su «Nature Astronomy» da Tomoharu Oka della Keio University di Yokohama, in Giappone. La scoperta, resa possibile dall'interferometro ALMA nel deserto di Atacama, in Cile, è rilevante per due motivi. L'esistenza dei buchi neri intermedi è una questione controversa e ogni nuovo candidato rappresenta un risultato notevole. Inoltre, la rilevazione di questi oggetti celesti è cruciale per capire come si formano i buchi al centro delle galassie, assai più massicci. Per esempio, quello al centro della Via Lattea ha una massa pari a quattro milioni di volte quella del Sole.



Seme. Una classe di buchi neri chiamati intermedi potrebbe risolvere il mistero della nascita dei buchi neri supermassicci.

I buchi neri intermedi potrebbero essere i semi da cui sono nati i buchi neri supermassicci (si veda *Buchi neri intermedi* in «Le Scienze» n. 523, marzo 2012), ma solo ulteriori rilevazioni permetteranno di verificare la validità dell'ipotesi.

Il torio ci riprova

C'è stato un tempo non troppo lontano in cui l'elemento chimico torio era considerato la promessa dell'energia nucleare. Molto più abbondante dell'uranio-235 usato nei reattori atomici che producono energia elettrica, il torio inoltre non pone problemi di uso a scopi militari, come invece accade con l'uranio e il plutonio, ottenuto come sottoprodotto nelle reazioni nucleari con lo stesso uranio (si veda *Energia nucleare del torio* in «Le Scienze» n. 423, novembre 2003).

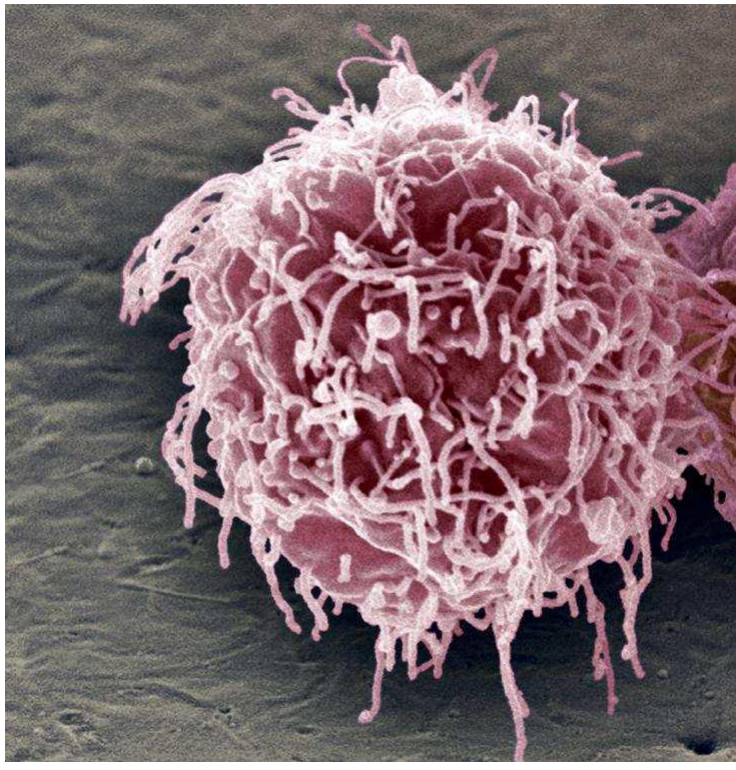
Lo sviluppo della tecnologia però si è arenato in parallelo al rallentamento drastico nella costruzione di centrali nucleari negli scorsi decenni. Ma qualcosa potrebbe cambiare. Il centro di ricerca nucleare olandese NRG, in collaborazione con la Commissione Europea, ha lanciato il Salt Irradiation Experiment, in cui sarà usato torio come combustibile per un prototipo di reattore nucleare a sali fusi, proprio nel periodo in cui l'India potrebbe mettere in funzione il primo reattore a torio del mondo.

R. Bick, B. Poindexter, Ut Medical School/SPL/AGF (*neuroni*); Jon Clark/iStock (*cannaiola*); gmutlu/ iStock (*buco nero*)

di Anna Rita Longo

Un nuovo messaggero immunitario

Ilenia Papa ha scoperto che la dopamina è prodotta anche dalle cellule del sistema immunitario per accelerare la produzione di anticorpi in caso di infezione



Steve Gschmeissner/SPL/AGF
Pagina a fronte: cortesia Irene Papa (*Papa*); Molekuul/SPL/AGF (*illustrazione dopamina*)

«Quel punto mi ero accorta di avere in mano una ricerca che prometteva bene e non potevo accettare che tutto il lavoro fatto andasse sprecato! Dovevo trovare una soluzione.»

Nel tono di voce di Ilenia Papa si può ancora sentire il misto di frustrazione e determinazione che avevano caratterizzato un periodo difficile nel corso dello studio che poi sarebbe approdato a «Nature» e, di lì, agli onori della stampa internazionale. Ma facciamo un passo indietro e seguiamo dall'inizio la storia di questa giovane ricercatrice, grazie alla quale si sono aperte nuove possibilità terapeutiche per malattie che affliggono molte persone. Ci troviamo all'Unità operativa di anatomia patologica del San Raffaele di Milano.

Tutto ha avuto inizio con un'osservazione di Claudio Doglioni, vero?

Sì, tutto è partito da un'osservazione riguardante una parte dei linfonodi chiamata centro germinativo. Il professor Doglioni del San Raffaele aveva riscontrato che all'interno del centro germinativo alcuni linfociti, le cellule Tfh, producevano, o meglio, esprimevano, come si dice in gergo tecnico, una particolare proteina, la cromogranina B, che si riteneva esclusiva del sistema nervoso e che è spesso associata alla presenza di dopamina, quel neurotrasmettitore che la divulgazione scientifica ha reso famoso come «ormone della felicità», perché contribuisce alla sensazione di benessere. Appurata la presenza di cromogranina B, era, quindi, spontaneo porsi altre domande: questo vuol dire che nel centro germinativo dei linfonodi si producono neurotrasmettitori? E qual è la loro funzione? Conclusa, però, questa prima parte dello studio mi sono trovata nell'impossibilità di andare avanti perché avevo bisogno della collaborazione di immunologi e nessuno sembrava interessato alla mia ricerca.

Che cosa ha sbloccato la situazione?

Quando ormai disperavo di trovare il modo di portare avanti il progetto, si è presentata l'occasione di partecipare a una conferenza sul centro germinativo a Birmingham. Sapevo che vi avrebbe partecipato la professoressa Carola Vinuesa, in servizio in Australia, che aveva effettuato studi per certi versi simili ai miei. Quando le ho illustrato il mio progetto di ricerca, ne è rimasta colpita e mi ha invitato nel suo laboratorio a Canberra presso la John Curtin School of Medical Research, dove poi ho proseguito con il dottorato e una borsa post-doc.

Ed è stato possibile trovare una risposta alle domande che vi eravate posti?

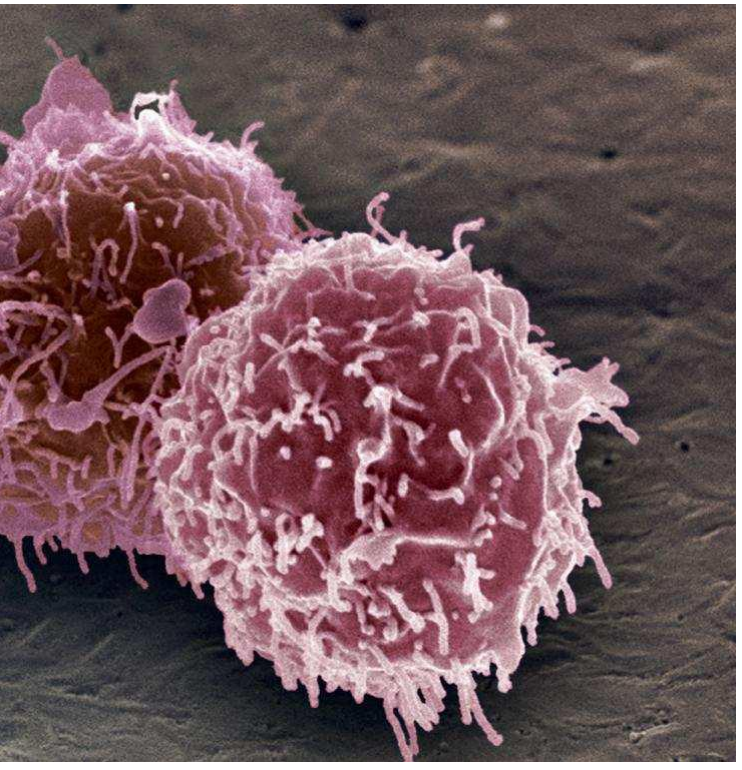
Sì, abbiamo, infatti, scoperto che i linfociti Tfh, all'interno del centro germinativo, producono dopamina e la rilasciano nel momento in cui interagiscono con i linfociti B, favorendo la produzione di anticorpi. La funzione della dopamina è accelerare la comunicazione tra i linfociti, rendendo più efficiente e veloce la risposta immunitaria dell'organismo che si trova a fronteggiare un'infezione. Sappiamo che i linfociti comunicano tra loro attraverso l'uso di proteine, le citochine, la cui azione si svolge, però, più lentamente. La dopamina, permette, invece, una comunicazione rapidissima, che abbrevia molto i tempi di reazione di fronte all'«invasore esterno», permettendo di difendersi prima che l'infezione si diffonda massivamente.

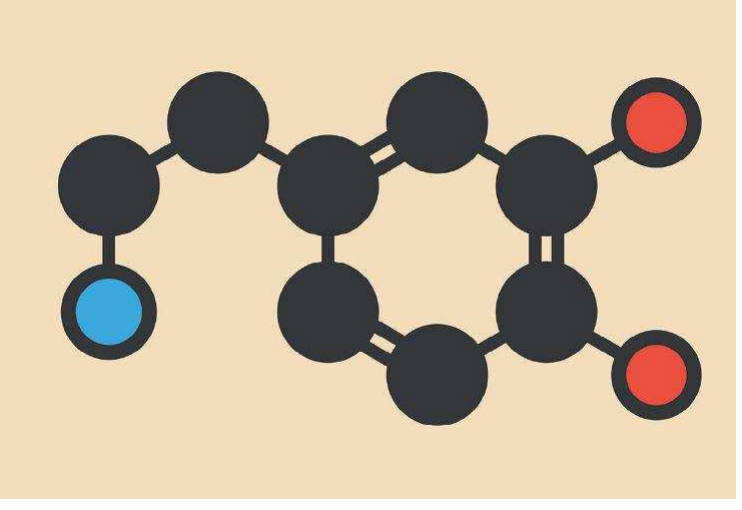
Sul piano pratico, come si sono svolte le vostre ricerche?

Ci siamo serviti di circa 200 campioni di tessuto tonsillare proveniente da bambini sottoposti a tonsillectomia. Dal tessuto abbiamo isolato i linfociti Tfh e B. Il lavoro per appurare il ruolo svolto dalla dopamina è stato realizzato *in vitro*, attraverso colture cellulari a breve termine (mezz'ora o poche ore) o a lungo termine (cinque giorni), con e senza dopamina. Nei cinque giorni si è potuto osservare chiaramente l'incremento nel numero delle cellule che producono anticorpi in presenza di dopamina, ma le prime avvisaglie si potevano già riscontrare nelle colture più brevi. Le

CHI È

Ilenia Papa ha iniziato il percorso di studi all'Università del Salento, dove si è laureata in biotecnologie a pieni voti. Trasferitasi a Milano per la laurea magistrale, si è iscritta al corso in biotecnologie mediche, molecolari e cellulari dell'Università Vita-Salute San Raffaele. Qui ha iniziato a interessarsi alle cellule Tfh del centro germinativo.
Nel 2012 inizia a collaborare come *visiting fellow* con il laboratorio di immunità umorale e autoimmunità della John Curtin School of Medical Research dell'Australian National University di Canberra. Sempre alla John Curtin, nel Dipartimento di immunologia e malattie infettive, svolge il proprio dottorato di ricerca ed è oggi titolare di una borsa post-doc.
Nonostante la giovane età (è nata nel 1983), le sue ricerche hanno già avuto ampia risonanza a livello internazionale.





Cellule e messaggero. Linfociti B umani al microscopio elettronico a scansione; sotto, la struttura della dopamina: in nero gli atomi di carbonio, in rosso l'ossigeno, in azzurro l'azoto.

colture sono state ripetute adoperando cellule provenienti da milze di topo e si è potuto vedere come i topi non adoperino questo meccanismo di comunicazione veloce basato sulla dopamina, che rappresenta, quindi, un vantaggio evolutivo per l'essere umano.

È stato possibile appurare l'entità di questo vantaggio evolutivo per la nostra specie?

Per farlo ci siamo serviti di una simulazione informatica, concludendo che gli esseri umani rispondono alle infezioni anche con giorni di anticipo rispetto al modello murino. È un po' come se la dopamina sostituisse una lettera tradizionale con una email o come se l'organismo umano si fosse dotato di un'efficientissima banda larga.

Avete già ipotizzato alcune applicazioni di questa interessante scoperta?

Pensiamo che ci possano essere importanti ricadute sulla clinica per malattie che colpiscono molte persone. Una volta scoperto un meccanismo di comunicazione tra cellule, è possibile inibirlo o potenziarlo per ottenere un effetto terapeutico. La nostra scoperta permetterebbe di usare per scopi nuovi alcuni farmaci già esistenti e ampiamente testati, con dosaggi e modalità di somministrazione differenti. Nel caso delle malattie autoimmuni, per inibire questa comunicazione superveloce, si potrebbero somministrare antagonisti dopaminergici, di solito utilizzati nel trattamento della schizofrenia, della psicosi e di alcune forme di depressione. Si aprono anche prospettive terapeutiche nei riguardi dei linfomi, alcuni dei quali (per esempio il linfoma follicolare, che resiste alle terapie oggi in uso) dipendono molto dal microambiente. Agire sul microambiente alterandolo potrebbe ostacolare la crescita del linfoma.

Si userebbe un meccanismo d'azione contrario nel caso dei vaccini, quando si vuole stimolare la migliore risposta immunitaria possibile. In questo caso si userebbero degli agonisti dopaminergici, oggi adoperati per il trattamento del morbo di Parkinson.

È sempre importante servirsi di molecole che non superino la barriera emato-encefalica, cioè il sistema di protezione naturale del sistema nervoso centrale, garantendo un'azione periferica con rischi minori.

La ricerca sta proseguendo?

Sì, per espandere le ricerche in un contesto più vicino a quello fisiologico senza le limitazioni degli studi in vitro, in questo momento stiamo lavorando su topi «umanizzati», cioè geneticamente modificati con l'introduzione di geni umani, nei quali, con una procedura mini-invasiva, abbiamo introdotto sotto pelle del tessuto tonsillare umano. Abbiamo già qualche risultato preliminare promettente, ma è presto per poter trarre conclusioni.

di Letizia Gabaglio

Una nuvola per l'edilizia

Personal Factory ha costruito una microfabbrica per materiali edili mettendo insieme chimica, elettronica e meccanica grazie al concetto di cloud

Di che cosa è composto un adesivo per piastrelle? Per il 95 per cento da materie prime, per il restante 5 per cento da reagenti chimici che le trasformano nel prodotto con le caratteristiche necessarie. E così per gran parte dei materiali che si usano nell'edilizia: per il 90-97 per cento sono composti da sostanze leganti e inerti, come sabbia, cemento, calce, che si trovano in tutto il mondo, mentre additivi chimici e resine sono solo una piccolissima parte del prodotto. Piccola ma essenziale perché è quella ad alta tecnologia, il *know-how* che solo alcuni hanno.

Chi non è pratico del mondo dell'edilizia certe cose le può ignorare ma chi, come Francesco Tassone, è vissuto e cresciuto fra malte, colle e smalti questo enorme spreco di risorse e di efficienza lo conosce bene. «La mia è una famiglia di produttori di materiali da costruzione, da sempre frequento questo mondo e quello che mi ha colpito è l'idea di trasportare enormi volumi di materie povere in giro per il mondo, portandole dove magari ce n'è in abbondanza. Che senso ha portare sabbia in Africa? Eppure è quello che si fa quando si spediscono lì materiali edili confezionati in Italia», dice Tassone. Da studente universitario il giovane ingegnere si applica al problema e già per la sua tesi di laurea cerca di trovare una soluzione, studiando la produzione distribuita. Finiti gli studi all'Università di Trento, Tassone rientra a casa, in Calabria, e ipoteca un appartamento per avere i soldi con cui provare a mettere in pratica la teoria elaborata: «Così ho messo insieme la prima microfabbrica, costruita con principi innovativi», racconta. «La logica con cui si gestisce la produzione non è più quella dello stabilimento ma quella del *cloud*».

Come le cialde

Era il 2007 e il *cloud manufacturing*, che ora comincia a essere un concetto diffuso anche con le politiche di incentivi all'industria 4.0, per molti era ancora un mistero. Non per il giovane ingegnere, che invece aveva le idee molto chiare: il suo sistema si compone di due parti, l'*hardware*, che è una pompa per polveri che miscela e confeziona i prodotti, e il *software* che controlla da remoto quello che fa la macchina. Il risultato è che i materiali edili si riescono a produrre come il caffè espresso con le cialde: si acquista la macchina e la capsula ma le materie prime sono quelle di casa nostra. L'acqua ed eventualmente zucchero o latte nel caso del caffè, sabbia o cemento nel caso dell'edilizia.

Certo il sistema di Tassone è ben più complesso delle macchinette che si trovano in ufficio o in cucina: la busta monodose venduta contiene quella piccola percentuale di sostanze chimiche di qualità e quantità giuste per ottenere il prodotto richiesto mentre il controllo del processo avviene da remoto attraverso il cloud. Quindi, di fatto, l'acquirente non deve conoscere la chimica perché gli basta premere un bottone per ottenere il risultato.

LA SCHEDA

Personal Factory

Fatturato
2,5 milioni di euro

Investimenti in ricerca
4,5 milioni di euro

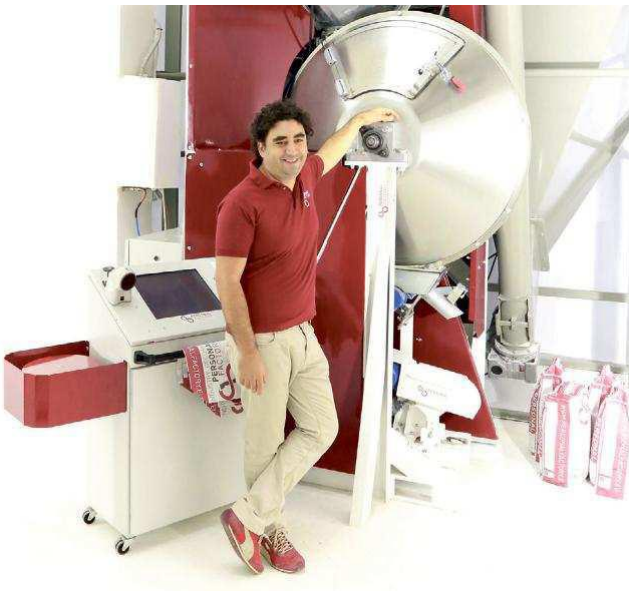
Dipendenti/collaboratori
21 di cui 7 impiegati in R&S

Brevetti rilasciati
3

Una volta costruito il prototipo e brevettata l'idea della microfabbrica, chiamata Origami, Tassone fonda la sua società, Personal Factory, e comincia a guardarsi intorno alla ricerca di investitori. Sono passati due anni da quando ha iniziato a lavorare al suo progetto e i soldi dell'ipoteca della casa sono finiti. Nel 2009 l'azienda raccoglie 1,3 milioni euro da due fondi di *venture capital*, a cui si è aggiunto un terzo fondo nel 2013.

«Siamo stati la prima azienda dell'Italia meridionale a prendere soldi dai *venture capitalist*», va avanti l'ingegnere. «D'altronde la nostra soluzione va nella direzione del risparmio, della maggiore ecosostenibilità ed efficienza. E non abbiamo concorrenti, sia-

Cortesia Personal Factory (*tutte le foto in questa pagina e nella pagina a fronte*)



risorse ma molte materie prime, la nostra soluzione è l'ideale. Alla fine del processo il costo dei prodotti può essere anche pari a un terzo di quelli importati», spiega Tassone. Per non parlare del risparmio in termini ambientali: l'analisi del ciclo di vita completo per la produzione di un chilogrammo di prodotto finito dimostra che con il sistema Personal Factory viene immesso in atmosfera il 50 per cento in meno di CO_2 rispetto al sistema classico.

Verso il riciclo degli scarti

Ma la mente visionaria di Tassone non si ferma alla costruzione di una fabbrica di soli dieci metri quadri: l'ingegnere si è posto anche il problema degli scarti dei cantieri. Partendo dal fatto che ogni anno nell'Unione Europea vengono spedite in discarica 300 milioni di tonnellate di scarti delle demolizioni, Personal Factory sta lavorando alla creazione di un sistema per riutilizzare in cantiere il demolito e trasformarlo in nuovi prodotti edili.

«Lavorando insieme all'Università della Calabria, abbiamo dimostrato che la prima fonte per ricostruire può essere un cantiere, costruendo un'imbarcazione con questo metodo», spiega Tassone. «Ora stiamo lavorando sulla parte industriale, ma le resistenze so-

Fabbrica personale. Accanto, la microfabbrica Origami, costruita e brevettata da Francesco Tassone; sopra, il laboratorio di Personal Factory, in provincia di Vibo Valentia; in alto Tassone con il prototipo di Origami.

mo gli unici al mondo a produrre una macchina che in dieci metri quadrati conserva le materie prime, le dosa, le miscela insieme al composto chimico, insacca il tutto e traccia l'intera produzione. La nostra è una soluzione integrata proprietaria *hard* e cloud che mette insieme chimica, elettronica, meccanica e software».

Una volta ottenuti i fondi, Tassone pensa a strutturare l'azienda: oggi lavorano con lui 14 ingegneri e sono diverse le collaborazioni e i progetti che Personal Factory porta avanti con università ed enti di ricerca. Mentre i suoi prodotti sono venduti in Siberia, Africa centrale, Sud America, per un totale di 30 paesi in tutto il mondo. «Se sei in un paese in via di sviluppo, con poche no molte, di tipo legislativo perché l'iter di certificazione dei prodotti è molto lungo, e di sistema perché vorrebbe dire stravolgere il modo con cui si smaltiscono i rifiuti edili».

Gli ingegneri di Personal Factory si stanno impegnando anche su un'altra linea di ricerca e sviluppo: la produzione di smalti per rivestimenti. Così come nel caso delle malte, quando si trasportano gli smalti per i rivestimenti si porta da una parte all'altra del mondo soprattutto acqua. Uno spreco di risorse enorme a cui Tassone pensa di mettere in freno con macchine in grado di produrre il rivestimento direttamente sul posto grazie a una capsula Personal Factory. Facile come farsi un caffè.

di Telmo Pievani
è professore ordinario di filosofia delle scienze biologiche dell'Università degli Studi di Padova

Il motore dell'ignoranza

La scienza non deve limitarsi alla reinterpretazione dell'esistente o del già noto

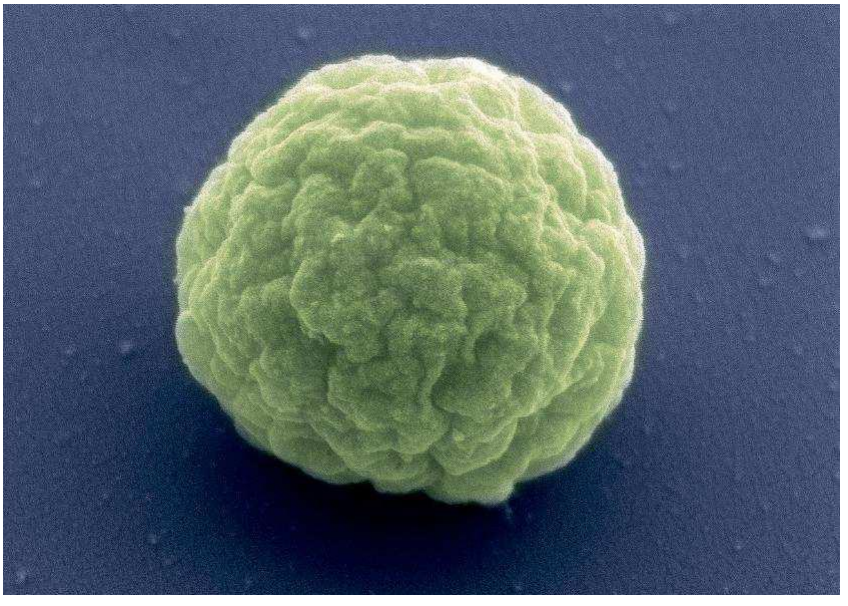
Vivremo in un mondo sempre più «crispizzato». L'acronimo CRISPR che descrive l'ultima generazione del *genome editing* – cioè la correzione di bozze del DNA tramite la forbice molecolare offerta dalla nucleasi Cas9 - sta diventando aggettivo, verbo e sostantivo, il che ne sancisce l'importanza. Dopo averne decifrato la struttura e la logica, dopo aver imparato a leggerlo, ora il DNA cominciamo a riscriverlo, e si apre un mondo nuovo.

C'è materia abbondante per un romanzo, i cui ingredienti sono stati già ben narrati in Italia da Anna Meldolesi nel libro *E l'uomo creò l'uomo* (Bollati Boringhieri, 2017): la disputa brevettuale che infuria tra competizioni e patteggiamenti; due scienziate formidabili (Jennifer Doudna ed Emmanuelle Charpentier) contendono la primogenitura della scoperta-invenzione a un giovanissimo e disinvolto ricercatore (Feng Zhang) e a un più attempato genetista visionario alle sue spalle (George Church); le ricadute applicative si spandono a macchia d'olio (terapia genica, nuovi modelli animali e biotecnologie vegetali, in futuro estinzioni programmate tramite *gene drive* e così via); la correzione di bozze è ben presto sperimentata anche su embrioni umani; moratorie internazionali vengono proposte e subito bocciate; si attende con trepidazione e qualche inquietudine l'annuncio della prossima scoperta ottenuta grazie a CRISPR. Quale sarà il prossimo colpo di scena?

Potendo crispizzare la linea germinale, *Homo sapiens* aggiunge al suo carnet un altro strumento per accelerare l'evoluzione. Ma ciò che più colpisce di questa innovazione tecnologica è che un filone di ricerca pura ha inaspettatamente svelato un fenomeno ignoto - cioè i meccanismi di difesa immunitaria dei batteri tramite precise forbici molecolari che sventano gli attacchi dei virus – dalla cui conoscenza è scaturito un cambiamento radicale nel paesaggio dell'ingegneria genetica. Anche senza scomodare l'abusato termine «rivoluzione», nulla sarà più lo stesso dopo CRISPR-Cas9 e una volta di più ci si accorge di quanto sia sfumato il diaframma tra ricerca pura e applicata.

Da questa vicenda emerge anche il ruolo fecondo e generativo dell'ignoranza nella scienza. Proprio così, l'ignoranza, parola di per sé sgradevole che nella ricerca ribalta la sua connotazione. Ora sappiamo che prima di CRISPR non sapevamo tante cose e chissà quante altre non ne sappiamo. Ha fatto irruzione l'ignoto, il serendipico. Una riduzione oggettiva di ignoranza (la nuova scoperta) produce nuove domande, che annunciano quante altre porzioni del mondo vivente sono inesplorate. Non sapevamo di non sapere.

Riscrivendo il libro della vita, capiamo per esempio quanto poco ancora sappiamo della sua sintassi e semantica. Manipoliamo sistemi viventi che conosciamo solo in parte, il che genera effetti imprevisti. Questi effetti imprevisti ci fanno scoprire un inatteso da cui derivano nuove conoscenze. Se non manipoli, non conosci. Quando un anno fa è stato pubblicato il primo organismo sintetico con genoma minimo (il batterio Syn 3.0, solo 473 geni), i ricercatori hanno potuto verificare che quasi un terzo di quei geni (149) ha una funzione finora ignota. Sono essenziali perché, togliendoli uno per volta, la cellula muore, ma non abbiamo idea di che cosa facciano. Parliamo di un terzo dei geni del genoma più piccolo esistente (in laboratorio). L'ignoranza è entrata in scena e promette ulteriori e impreviste conoscenze, visto che adesso gli scienziati si tufferanno in quei misteriosi 149 geni.



Al minimo. Il batterio Syn 3.0 prodotto al J. Craig Venter Institute è il primo organismo sintetico con genoma minimo; la sua creazione ha portato a domande ancora inevase.

Così la sfida tra cervello umano e natura si rinnova incessantemente. La scienza non può mai limitarsi alla reinterpretazione dell'esistente o del già noto. L'inedito scompagina le carte, spostando sempre un po' più in là la frontiera dei dibattiti (anche di quelli bioetici) e rinnovando una delle più affascinanti specificità del sapere scientifico: a forza di accorgersi di non sapere, si finisce per sapere sempre di più.

Thomas Deerinck, NCMIR/SPL/AGF

di Edoardo Boncinelli
Università Vita-Salute San Raffaele, Milano

Esperimenti sull'idea di causalità

Test di laboratorio indagano sul rapporto tra causa ed effetto e sulla natura del tempo

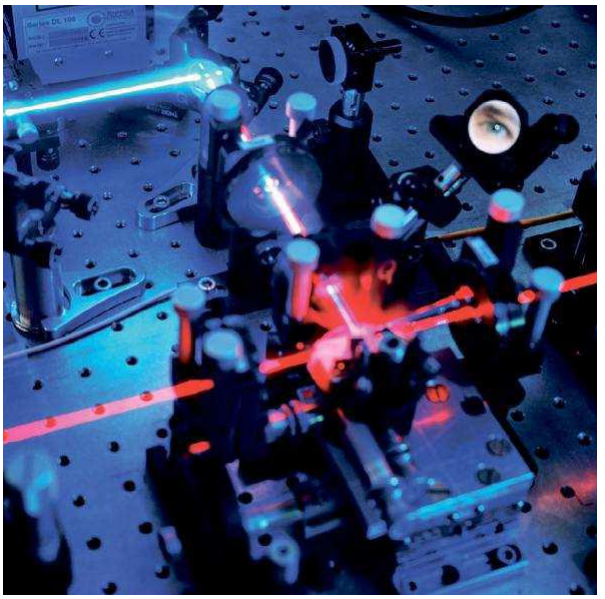
Sul numero di «Nature» del 29 giugno c'è un articolo di rassegna a firma di Philip Ball che riporta esperimenti di laboratorio che potrebbero avere a che fare contemporaneamente con la natura dell'idea di causa, con la reversibilità del tempo, con la vera faccia della meccanica quantistica e la sua possibile unificazione con la teoria della relatività generale, un'impresa non ancora riuscita a nessuno. E scusate se è poco!

Gli esperimenti riportati nell'articolo hanno in primo luogo a che fare con l'idea di causa, una veneranda assunzione fisico-filosofica che risale a più di venti secoli fa. A parte le discussioni fra filosofi, tutta la scienza degli ultimi secoli è vissuta sull'idea di causa e di effetto, una delle poche convinzioni che sembravano a prova di bomba. Per gli oggetti macroscopici la cosa può andare, ma per quelli microscopici? Già la meccanica quantistica del secolo scorso aveva reso assai malfermo il concetto, ma ora sembra che ci si debba addirittura rinunciare. Vediamo come.

Per attraversare la strada dove si trovano due cancelletti, diciamo quello rosso e quello verde, una persona può passare prima dal rosso e poi dal verde o viceversa, ma è sempre possibile dire se è passata prima dal rosso oppure prima dal verde. Questo però non vale per i fotoni che si trovano ad attraversare il laboratorio di Philip Walter all'Università di Vienna. Per ciascuno di loro non si può dire se passa prima da una fenditura e poi da un'altra o viceversa. Questa informazione non viene confusa o persa nel tempo; semplicemente non esiste. In un primo esperimento del 2015 i risultati sembravano subito mettere in discussione il concetto stesso di causalità, il fenomeno per cui un evento conduce a un altro. E un po' era messo in discussione il concetto stesso di tempo, che sembrava così poter scorrere in due diverse direzioni contemporaneamente.

Nel linguaggio di ogni giorno tutto questo suona assurdo, ma nel formalismo della fisica quantistica il discorso può non fare neanche una grinza. I ricercatori pensano che creare sistemi che mancano di una chiara indicazione di una causa e di un effetto possa spingere la ricerca verso nuove, nuovissime mete. Tra queste spiccano le applicazioni al computer quantistico, una maniera migliore di raccontare la fisica quantistica, che sia magari un po' più «intuitiva», e la benedetta unificazione fra le due più potenti teorie fisiche: relatività e appunto fisica quantistica.

Uno dei fenomeni più interessanti e sorprendenti che la fisica quantistica abbia messo in luce è il cosiddetto *entanglement*. Due particelle nascono contemporaneamente e partono in direzioni opposte. Supponiamo che abbiano due caratteristiche complementari, per esempio una ha un campo magnetico che si avvita verso destra e l'altra un campo che si avvita verso sinistra, ma a priori non si possa sapere quale è sinistrorsa e quale è destrorsa. Per saperlo occorre fare un'osservazione almeno su una delle due, ma appena lo si fa, anche l'altra particella, distante magari anni luce, «getta la maschera» e mostra la condizione opposta a quella osservata per la prima. La misurazione sulla prima particella ha un effetto immediato anche sullo stato della seconda. Immediato vuol dire immediato, con un'azione che si trasmette con una velocità che può essere anche superiore a quella della luce. Nonostante la sua stranezza, però, anche il fenomeno dell'entanglement non viola la relazione di causalità: l'effetto non può precedere la sua causa.



In laboratorio. Apparato per esperimenti sull'entanglement di fotoni da sfruttare per lo sviluppo di tecniche crittografiche.

Come si fa allora a mettere a repentaglio la relazione di causa e effetto nelle particelle elementari? Queste mostrano una proprietà impensabile per un oggetto macroscopico: possono stare contemporaneamente in diverse condizioni, luoghi diversi, con velocità diverse e energie diverse. Questa loro facoltà è chiamata sovrapposizione. Una particella o un sistema che si trovino in uno stato di sovrapposizione sembrano avere proprietà diverse allo stesso tempo, almeno fino a che non si faccia una sperimentazione rivelatrice. Ecco allora il trucco per non conoscere la sequenza causale, e quindi temporale, di due eventi subatomici: si prepara il sistema in modo che stia in uno stato di sovrapposizione «prima rosso e poi verde» ma anche «prima verde e poi rosso». Elementare. Ma sconvolgente. Forse occorrerà ripensare la causalità stessa, almeno nel micromondo. E questo dove ci condurrà? La mente non può mai riposare. E non deve!

Volker Steger/SPL/AGF

di Piergiorgio Odifreddi
professore ordinario di logica matematica all'Università di Torino
e visiting professor alla Cornell University di Ithaca (New York)

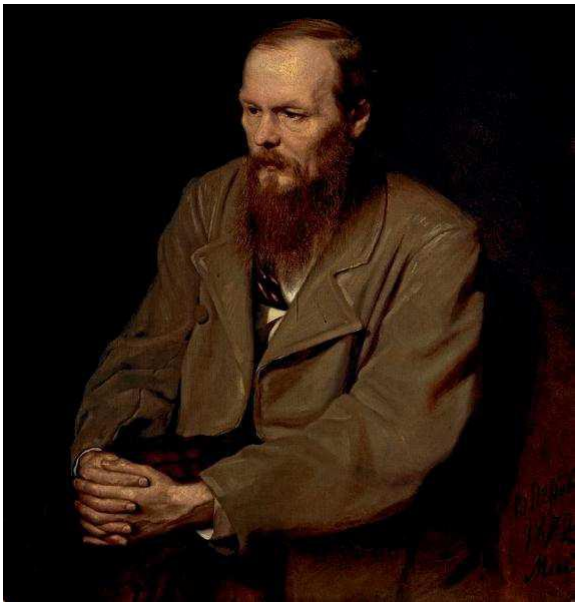
Due più due fa cinque

Molti personaggi letterari rivendicano il diritto di ribellarsi contro le leggi aritmetiche

Il 1864 fu un anno-spartiacque per Fëdor Dostoevskij. Prima di allora era stato uno scrittore realista e laico, da *Povera gente* (1846) a *Umiliati e offesi* (1861), e in seguito sarebbe diventato uno scrittore esistenzialista e religioso, da *Delitto e castigo* (1866) a *I fratelli Karamazov* (1880). In quell'anno, pubblicò un manifesto dell'irrazionalismo intitolato *Memorie da una topaia*, il cui protagonista era un abbietto personaggio che si autodefiniva appunto «un topo da fogna».

Nel romanzo, il cui titolo viene spesso tradotto *Memorie dal sottosuolo*, Dostoevskij abiura gli studi tecnici che aveva fatto da giovane, laureandosi in ingegneria, e sminuisce il pensiero scientifico e razionale nei confronti di quello umanistico e irrazionale, inaugurando un *topos* che culminerà nel romanzo-mostro *L'uomo senza qualità* (1930–1942) di Robert Musil, un altro ingegnere apostata come lui.

Il dogma centrale del pensiero scientifico è identificato da Dostoevskij nell'espressione 2 + 2 = 4, che ricorre più volte come esempio di coercizione razionale. Per esempio: «Protestare non è possibile: due più due fa quattro. La natura non chiede permesso, non ha niente a che fare con i desideri, non si preoccupa di sapere se le sue leggi piacciono o no. Bisogna accettarla com'è, con tutte le sue conseguenze. Ma, per Dio, che m'importa delle leggi della natura e dell'aritmetica, se a me "due più due fa quattro" non piace? Magari non riuscirò a buttar giù questo muro a testate, ma non lo accetterò soltanto perché è un muro che non posso abbattere».



Romanziere ex ingegnere. Ritratto di Dostoevskij del 1872, opera del pittore russo Vasilij Grigor'evič Perov.

Dostoevskij arriva addirittura a sostenere che l'uomo libero dovrebbe svincolarsi da questa costrizione aritmetica, proclamando invece che 2 + 2 = 5. Infatti, «"Due più due fa quattro" è una cosa insopportabile. "Due più due fa quattro" è solo un'impertinenza. "Due più due fa quattro" ha l'aria di uno sbruffone che si metta in mezzo alla strada con le mani sui fianchi e vi sputi addosso. "Due più due fa quattro" sarà anche una bella cosa, ma sul piano del bello "due più due fa cinque" è ancora meglio». In conclusione, «la coscienza sta infinitamente più in alto del due più due fa quattro». Dopo il "due più due fa quattro" non solo non resterebbe più nulla da fare, ma nemmeno nulla da conoscere».

La scelta di 2 + 2 = 5 come esempio archetipico del pensiero irrazionale è in realtà molto precedente a Dostoevskij. Già la *Ciclopedia* di Ephraim Chambers (1728), che costituì il modello della più famosa *Enciclopedia* di Denis Diderot e Jean Baptiste Le Rond d'Alembert (1751–1780) , spiegava alla voce «Assurdo»: «Sarebbe assurdo affermare che due più due fa cinque, o negare che due più due fa quattro».

Dostoevskij non è stato neppure il primo letterato a rivendicare il diritto, o almeno il desiderio, di sbagliare le addizioni. Lord Byron, per esempio, scriveva già nel 1813, in una lettera alla futura moglie Annabella: «Io so che due più due fa quattro, e mi piacerebbe anche sapere perché, ma devo ammettere che se riuscissi invece a far venire due più due uguale a cinque sarei molto più soddisfatto».

Fortunatamente, non tutti gli umanisti sono della stessa risma. Per esempio, l'abate Emmanuel Joseph Sieyès scriveva nel pamphlet *Che cos'è il terzo stato?* (1789), che divenne il manifesto della Rivoluzione Francese: «Se la Costituzione stabilisce che duecentomila persone su ventisei milioni di cittadini possono eleggere due terzi del parlamento, allora due più due fa cinque». E Victor Hugo commentava così il risultato del referendum del 1851 a favore del colpo di stato di Napoleone III, in *Napoleone il Piccolo* (1852): «Non si va lontano se sette milioni e mezzo di votanti dichiarano che due più due fa cinque, la linea retta è la più lunga e il tutto è minore delle parti».

Nel Novecento è stato George Orwell a uguagliare il pensiero totalitario all'imposizione di equazioni sbagliate, scrivendo in *1984* (1949): «Se il partito dicesse che due più due fa cinque, e prima o poi lo farà, dovremmo crederlo. D'altronde, come sappiamo che due più due fa quattro?». Forse si era ispirato allo stalinista Yakov Guminer, che in un manifesto del 1931 aveva scritto: «Due più due uguale cinque, ovvero l'aritmetica del primo piano quinquennale più l'entusiasmo dei lavoratori». O al nazista Hermann Göring, che aveva dichiarato: «Se il Führer vuole, due più due fa cinque». In sintesi, attenzione alle idee del secondo Dostoevskij, visto che costituiscono la linea più breve di collegamento tra Stalin e Hitler.

Vasilij Perov/Wikimedia Commons

di Amedeo Balbi
Professore associato di astronomia e astrofisica presso il Dipartimento di Fisica dell'Università di Roma «Tor Vergata». Il suo ultimo libro è *Dove sono tutti quanti?* (Rizzoli, 2016)

Quarant'anni di Voyager

Le due sonde della NASA lanciate nel 1977 continuano a inviare segnali e dati

Nei primi anni settanta, l'allora presidente degli Stati Uniti Richard Nixon si ritrovò a valutare la proposta di un'ambiziosa (e costosa) missione spaziale. L'idea era visitare uno dopo l'altro, nel giro di alcuni anni, i quattro pianeti giganti del sistema solare (Giove, Saturno, Urano e Nettuno). Un «Grand Tour» reso possibile da un raro allineamento tra i pianeti, che si verifica circa ogni 175 anni. Si racconta che, per convincere Nixon, qualcuno ebbe il colpo di genio di far leva sul confronto storico: «La volta precedente, a quella scrivania c'era seduto Thomas Jefferson, e lui non ha potuto farlo.»

Nixon firmò, e così prese il via il programma Voyager della NASA, di cui si è da poco celebrato il quarantennale. Per una volta, non si tratta solo di una ricorrenza simbolica: le sonde Voyager 1 e 2, infatti, sono tutt'ora operative, e continuano a inviarci segnali e dati dalle regioni più remote e sconosciute del sistema solare. Voyager 1, in particolare, è il manufatto umano che si è spinto più lontano dalla Terra: attualmente si trova a circa 20 miliardi di chilometri di distanza, si allontana dal Sole a oltre 60.000 chilometri all'ora, e i suoi segnali impiegano ben 19 ore a raggiungerci. Qualche anno fa Voyager 1 è uscita dall'eliosfera, ed è entrata ufficialmente nella terra di nessuno fra una stella e l'altra. È diventata, a tutti gli effetti, la prima sonda interstellare.

In questi quarant'anni, il mondo è profondamente cambiato. Dal punto di vista tecnologico, le Voyager sono ormai oggetti di antiquariato (il processore del computer di bordo è meno potente di quello della chiave elettronica di un'automobile moderna), ma grazie a loro la nostra conoscenza del sistema solare si è accresciuta in un modo che oggi si fatica a mettere in prospettiva. Le immagini e i dati di Giove e Saturno raccolti delle Voyager furono un grande passo avanti rispetto a quelli presi pochi anni prima dalle sonde Pioneer 10 e 11 (e un salto di qualità enorme rispetto alle macchie sfuocate dei più potenti telescopi terrestri dell'epoca). Inoltre, grazie alle Voyager si è iniziato a considerare le lune di Giove e Saturno come veri e propri mondi, molto diversi tra loro. Si è scoperto che Io ha un'attività vulcanica, si è intuita la presenza di un oceano sotto il ghiaccio di Europa, si è apprezzata la ricca atmosfera di Titano. Voyager 2 è tutt'ora l'unica missione ad aver sorvolato Urano e Nettuno (Voyager 1 prese una traiettoria diversa e lasciò il piano dell'eclittica, dopo aver effettuato uno straordinario incontro ravvicinato proprio con Titano). Altre missioni, in seguito, hanno studiato con maggiore dettaglio sia il sistema di Giove (la missione Galileo) sia di Saturno (la missione Cassini/Huygens), e altre ancora lo faranno nel prossimo futuro. Tuttavia, dal momento che può esserci una sola prima volta, le sonde Voyager resteranno speciali, indipendentemente dai progressi che abbiamo fatto e che senza dubbio faremo nei prossimi anni. Nella storia dell'esplorazione umana, le Voyager hanno un posto accanto alle prime imbarcazioni che dall'Europa si sono avventurate attraverso l'Oceano Atlantico.

L'oggetto più lontano. Illustrazione della sonda Voyager 1, lanciata il 5 settembre 1977, che entra nello spazio interstellare dopo essere uscita dall'eliosfera.

Per qualche anno ancora, finché i generatori alimentati a radioisotopi daranno potenza elettrica agli strumenti di bordo, le Voyager saranno i nostri messaggeri dalla frontiera spaziale. Ma anche dopo essersi spente, continueranno ad andare, potenzialmente inarrestabili, spingendosi sempre più lontano, per milioni o addirittura miliardi di anni. Quelle due sonde, i loro strumenti scientifici, e i suoni e le immagini incise sui dischi dorati che portano a bordo, potrebbero persino essere tutto quello che resterà della nostra specie e del nostro pianeta quando anche il Sole si sarà spento. Non sarebbe un brutto modo per essere ricordati.

Cortesia NASA/JPL-Caltech

di Giorgio Manzi
Insegna paleoantropologia presso il Dipartimento di biologia ambientale dell'Università «La Sapienza» di Roma, dove dirige il Museo di antropologia «Giuseppe Sergi»

Eccessi di Creta

Impronte antichissime scoperte sull'isola potrebbero non essere di nostri antenati

Altro che Africa! Creta, l'isola di Creta – lì al centro del Mediterraneo orientale, considerata la culla della nostra civiltà – potrebbe essere stata anche la culla dell'umanità intera, anzi sarebbe proprio quella la vera *cradle of humankind* nel tardo Miocene. Affermazioni di questo tipo, con enfasi più o meno marcate, si trovano un po' ovunque sul Web e sulla carta stampata dopo il 31 agosto scorso, quando è apparso on line (in vista della pubblicazione sui «Proceedings of the Geologists' Association») l'articolo a firma del paleontologo polacco Gerard D. Gierlínski e di vari altri colleghi dal titolo: *Possible hominin footprints from the late Miocene (c. 5.7 Ma) of Crete?*.

Vediamo com'è andata. Banalmente, nel 2002 Gierlínski si trovava in vacanza a Creta dalle parti di Trachilos, all'estremità nord occidentale dell'isola, quando si è imbattuto in una superficie concrezionata di sabbie Mio-Plioceniche, probabilmente la riva di un piccolo delta fluviale in prossimità della costa, dove ha individuato una serie di impronte di mammiferi risalenti a un'epoca verosimilmente compresa fra 8,5 e 3,5 milioni di anni fa. Non è chiaro se gli avesse dato molto peso, ma certo è che otto anni dopo Gierlínski torna sul sito insieme a uno specialista di impronte fossili (il polacco Grzegorz Niedzwiedzki) oggi all'Università di Uppsala, in Svezia, e così inizia lo studio ora arrivato alla pubblicazione con il coordinamento del professor Per E. Ahlberg (anche lui a Uppsala).

Gli autori hanno studiato una paleosuperfice piuttosto estesa (oltre 20 metri in lunghezza), concentrandosi su un ritaglio di livello stratigrafico emergente che hanno denominato B2 e nel quale sono impresse una cinquantina di impronte di varia natura, fra cui quelle riferite a due distinte piste di piccole creature bipedi che si muovevano entrambe verso sud-ovest. Hanno campionato e analizzato i sedimenti, hanno intercettato le stesse in serie stratigrafiche più potenti, hanno poi rilevato le impronte con scanner laser e infine le hanno accuratamente studiate sotto il profilo sedimentario e morfologico, ovviamente in un quadro comparativo icnologico (la scienza che studia le impronte di animali).

Dall'esame dei sedimenti è emersa una data – 5,7 milioni di anni fa – che è basata sia sui foraminiferi (protozoi marini provvisti di guscio calcareo) inclusi nelle sabbie fossili sia su valutazioni relative alla regressione marina del tardo Messiniano (evento geologico e paleoambientale della fine del Miocene, che portò al parziale prosciugamento del Mediterraneo). Dallo studio delle piste è emerso che si tratta di impronte caratterizzate da vari stati di conservazione, ma che nell'insieme descrivono una pianta del piede appoggiata al terreno, la presenza di cinque dita allineate, di grandezza decrescente (dall'alluce verso le altre dita), senza artigli, un calcagno piuttosto stretto rispetto al ventaglio anteriore, una lunghezza compresa fra 9,4 e 22,3 centimetri e, soprattutto, un'andatura bipede.

L'analisi comparativa ha portato a escludere alcune possibilità alternative e a indicare come più probabile che le creature che lasciarono quelle impronte fossero scimmie antropomorfe bipedi, ovvero dei possibili antenati dell'uomo. Queste le esatte parole degli autori (coerenti con il punto di domanda alla fine del loro titolo): «La morfologia delle impronte suggerisce che chi le ha prodotte fosse un membro ancestrale della linea evolutiva ominina, ma poiché Creta è distante dall'area geografica dei nostri antenati, dobbiamo anche prendere in considerazione la possibilità che si trattasse di un primate finora sconosciuto con un'anatomia del piede simile a quella pre-umana.»

Propendo per la seconda ipotesi.

Potrebbe essere un caso di parallelismo adattativo: interessante, ma non rivoluzionario.

Due per uno. Due delle impronte scoperte da Gierlínski e colleghi a Creta, che potrebbero essere state lasciate da un singolo individuo in posizione statica.

Cortesia G. D. Gierlínski e altri/Proc Geol. Assoc.

SALUTE

Malattie che cambiano con il clima

Analizzati gli effetti di fattori climatici sulla diffusione di patogeni in Europa

Marka/Getty Images

Occhio alla pioggia. Le variazioni di pioggia e umidità sono determinanti per la diffusione di oltre un terzo dei circa 150 patogeni che hanno un impatto importante sulla salute dei cittadini europei in termini di mortalità e disabilità.

L'Organizzazione mondiale della Sanità ha fatto i conti: dando per scontati crescita economica e progressi in campo medico-sanitario, tra il 2030 e il 2050 ci saranno ogni anno migliaia di nuovi decessi per malattie infettive. La causa è il cambiamento climatico e i suoi effetti sulla diffusione di alcuni patogeni.

Gli studi relativi all'impatto del clima su biologia, distribuzione e infettività dei patogeni sono in aumento, ma manca una revisione sistematica che dia l'idea della dimensione globale del problema. A occuparsene, almeno per l'Europa, è stato un gruppo coordinato dall'Università di Liverpool, nel Regno Unito, con uno studio pubblicato su «Scientific Reports». Passando in rassegna la letteratura esistente, i ricercatori hanno selezionato 157 patogeni presenti nel continente europeo, scelti tra quelli a maggior «impatto» sulla salute pubblica in termini di mortalità e disabilità, dei quali è stata accertata la sensibilità a 190 fattori climatici, alcuni definiti «primari» come temperatura, umidità o piovosità, altri «secondari» (combinazione, conseguenza o indice dei primi) come altitudine o concentrazione di particolato atmosferico.

Oltre il 63 per cento dei patogeni è risultato sensibile ad almeno un fattore climatico (i più determinanti sono, nell'ordine: umidità, piovosità, temperatura e particolato). Di questi, il 37,4 per cento ha un'unica «dipendenza», come il virus dell'epatite B che risponde alla piovosità o quello della varicella, sensibile all'umidità. Per gli altri la situazione si complica: il batterio del colera, per esempio, dipende da ben nove fattori climatici. Nella maggior parte dei casi, però, è una coppia di elementi a influenzare biologia ed ecologia dei patogeni (la più frequente è quella tra umidità e piovosità). Ne sono un esempio il batterio della meningite meningococcica, sensibile a umidità e particolato, o il virus della rabbia, sensibile a piovosità e altitudine.

Sono casi che dimostrano quanto gli attuali modelli previsionali sulla diffusione delle malattie infettive sensibili al clima, spesso «tarati» su un'unica variabile ambientale, siano inadeguati. I patogeni che si trasmettono attraverso insetti e zecche o contaminando acqua, cibo e suolo «soffrono» il clima più di quelli che si diffondono per contatto o manipolando oggetti contaminati (i virus dell'HIV o del morbillo, per esempio, non sono sensibili ad alcun fattore climatico). Infine, la maggior parte delle malattie sensibili al clima sono zoonosi, cioè passano dagli animali all'essere umano. Un motivo in più per non abbassare la guardia, visto che il 75 per cento delle nuove emergenze sanitarie sono zoonotiche.

Martina Saporiti

COSMOLOGIA

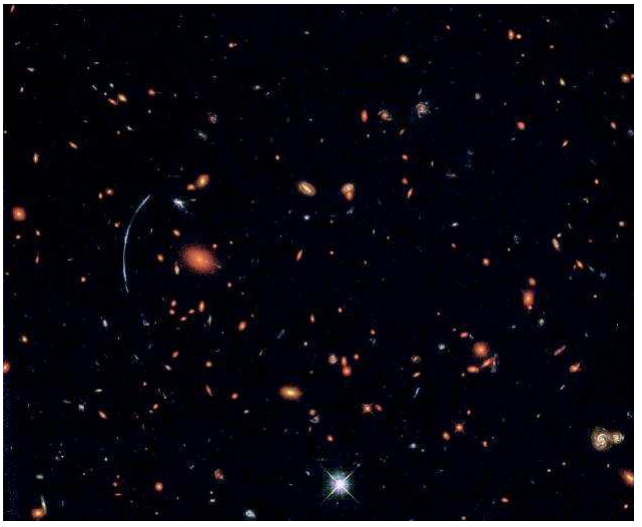
Un universo meno concentrato

I primi dati della Dark Energy Survey hanno rivisto al ribasso la distribuzione di materia nel cosmo

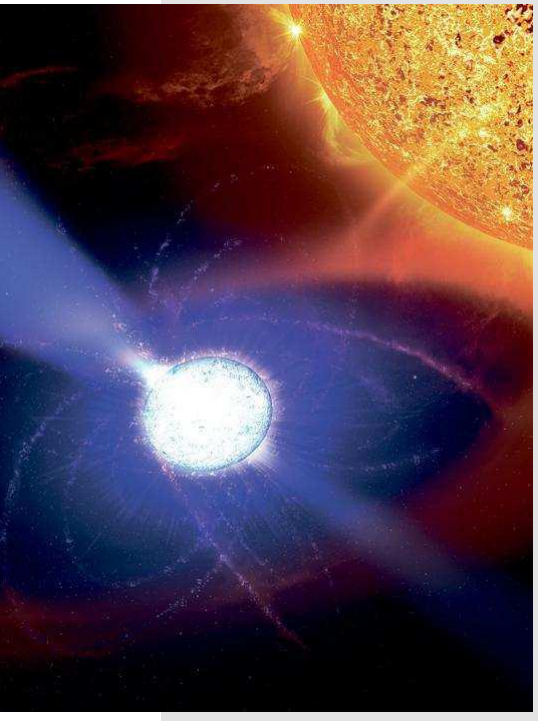
La distribuzione della materia nell'universo è più diffusa e meno concentrata rispetto a quanto ipotizzato. A rivelarlo sono i primi risultati della collaborazione internazionale Dark Energy Survey (DES), che analizza la quantità e la distribuzione di materia oscura studiando milioni di galassie. In particolare, durante il primo anno di osservazioni, il gruppo di ricercatori della collaborazione coordinata da Joshua Frieman del Fermi National Accelerator Laboratory a Batavia, negli Stati Uniti, ha misurato le forme apparenti di 26 milioni di galassie del cielo australe. Queste misurazioni hanno permesso a Frieman e colleghi di calcolare gli effetti di lente gravitazionale debole nell'intera area di cielo osservata e di ricostruire così la relativa distribuzione della materia. Come previsto dalla teoria generale della relatività, infatti, la presenza della materia curva le traiettorie dei fotoni provenienti da sorgenti in secondo piano rispetto alla linea di vista, producendo una deformazione più o meno intensa delle sorgenti stesse.

Con i dati raccolti dal telescopio Blanco, un riflettore da quattro metri di apertura presso il Cerro Tololo Inter-American Observatory, sulle Ande cilene, il gruppo ha confermato che solo il quattro per cento del contenuto dell'universo è composto da materia ordinaria. Tuttavia, mentre gli studi della radiazione cosmica di fondo, come quelli condotti dalla sonda Planck dell'Agenzia spaziale europea, forniscono per la materia oscura percentuali attorno al 29 per cento, DES ha trovato per questa valori più bassi, attorno al 26 per cento, e conseguentemente più alti per l'energia oscura.

Questi dati, presentati alla recente riunione dell'American Physical Society al Fermilab, per quanto ancora compatibili con il modello standard della cosmologia, dimostrano che il grado di concentrazione della materia è più basso del previsto e che le strutture potrebbero essersi aggregate in tempi più lunghi, mentre l'accelerazione dell'espansione causata dall'energia oscura potrebbe essere entrata prima in azione.



Emiliano Ricci



Dubbi sulle supernove come candele standard

Il castello dell'energia oscura poggia tutto sulle loro fondamenta, ma da qualche tempo c'è il timore che si stiano lentamente sgretolando. Stiamo parlando delle supernove di tipo Ia, con cui i cosmologi, nel 1998, hanno scoperto l'accelerazione dell'espansione dell'universo, spiegata appunto con l'introduzione dell'energia oscura. Fino a poco tempo fa si pensava che questo tipo di supernove potesse essere usato come candela standard, cioè come sorgente di riferimento per la misurazione delle distanze. Ipotizzando che abbiano tutte la stessa origine – una nana bianca che accresce materia da una stella compagna fino a superare la massa limite ed esplodere come supernova – tutte dovrebbero raggiungere la stessa luminosità intrinseca di picco. Per molto tempo, tuttavia, le ricerche dell'eventuale stella compagna della nana bianca non hanno dato frutti, tanto che negli ultimi anni si è fatta strada l'ipotesi alternativa: la fusione di due nane bianche.

Si tratta di un grosso problema per i cosmologi, perché questa origine alternativa non garantisce l'omogeneità delle luminosità di picco, escludendo quindi l'uso delle supernove come candele standard. Ma adesso, un gruppo di ricercatori guidato da Griffin Hosseinzadeh dell'Università della California a Santa Barbara ha finalmente scoperto le tracce di una stella compagna della nana bianca esplosa lo scorso 10 marzo come supernova SN 2017cbv nella galassia NGC 5643, distante circa 55 milioni di anni luce. Hosseinzadeh e colleghi hanno osservato con continuità l'evoluzione della curva di luce della supernova e del gas espulso in rapida espansione, scoprendo un eccesso ultravioletto entro i primi cinque giorni dall'esplosione. La scoperta, annunciata su «Astrophysical Review Letters», è stata interpretata come l'impatto del gas espulso con la superficie della compagna, una stella con un raggio pari a 20 volte quello solare e da cui la nana bianca distava meno di 60 raggi solari. Una nuova speranza per restituire alle supernove di tipo Ia il ruolo di candele standard, ma siamo solo alla prima scoperta.

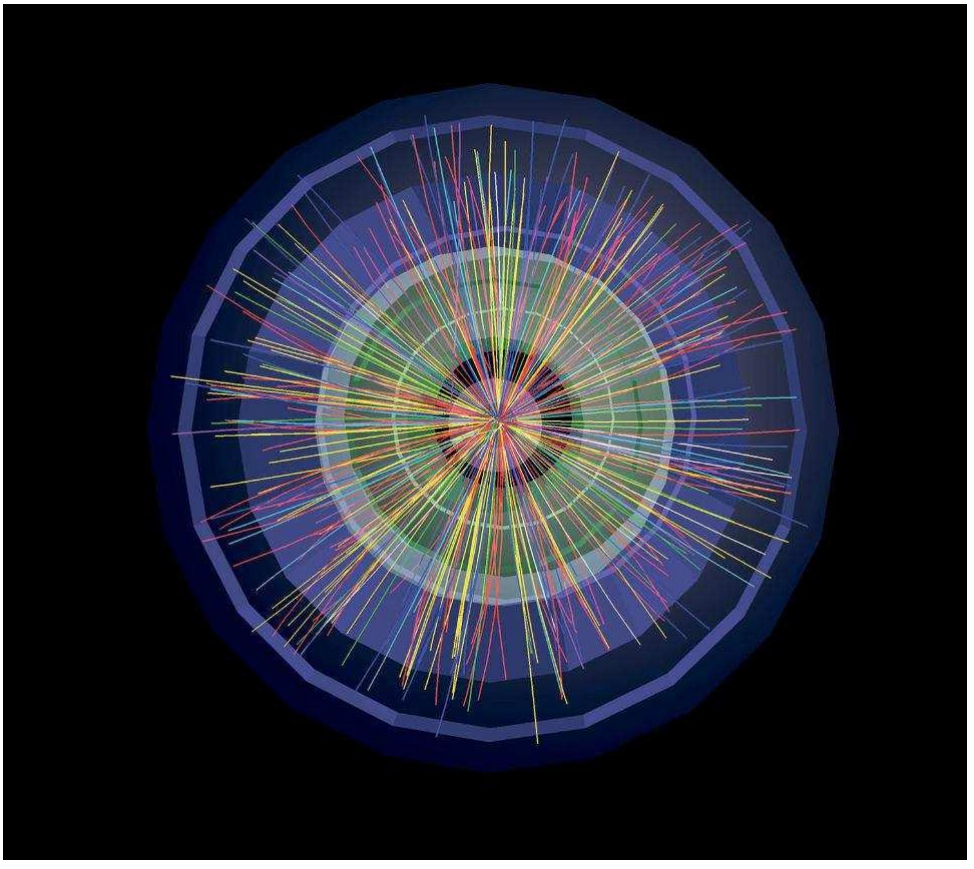
Emiliano Ricci

Cortesia NASA/ESA/T. Johnson, Università del Michigan (*ammasso di galassie SDSS J1110+6459*); cortesia Casey Reed/NASA (*illustrazione supernova Ia*)

FISICA

Dialoghi tra raggi di luce

Dopo decenni di tentativi è stato finalmente osservato il fenomeno dello scattering tra fotoni



CERN/SPL/AGF

La QED, ossia la teoria quantistica che descrive l'elettromagnetismo, prevede l'esistenza di un fenomeno proibito nel contesto della fisica classica: lo *scattering* della luce con se stessa ad alte energie. Si tratta di un processo estremamente raro in cui due fotoni, i quanti di luce, interagiscono tra loro, subendo una modifica delle traiettorie e di altre importanti proprietà fisiche, come l'energia.

Per via della sua rarità l'evento è difficile da osservare, ma dopo decenni di tentativi infruttuosi i ricercatori dell'esperimento ATLAS del CERN di Ginevra sono finalmente riusciti a ottenere la prima prova diretta di questo fenomeno, pubblicando il risultato su «Nature Physics».

Gli scienziati avevano previsto la possibilità di realizzare la misurazione studiando le collisioni tra ioni piombo durante il secondo *run*, partito nel 2015, dell'acceleratore LHC del CERN, che ha portato a un sensibile aumento dell'energia delle collisioni e della loro luminosità (un parametro che misura il numero di eventi per la sezione d'urto, ovvero per la probabilità che un certo processo avvenga, al secondo). Per poter osservare questo evento è infatti necessario accelerare particelle elettricamente cariche (e possibilmente pesanti, come il piombo) a velocità molto elevate, quanto più prossime alla velocità della luce: in questo modo attorno a esse si genera un campo elettromagnetico molto intenso, che corrisponde a un enorme flusso di fotoni. Quando gli ioni vengono accelerati gli uni contro gli altri si «portano dietro» i fotoni, che possono interagire tra loro anche in assenza di collisioni tra gli ioni.

Studiando più di quattro miliardi di eventi raccolti nel 2015, la collaborazione ATLAS ha identificato 13 candidati per l'interazione fotone-fotone, con una significatività statistica pari a 4,4 sigma, che certifica l'evidenza di aver raccolto la prima prova diretta del fenomeno.

I ricercatori però non si accontentano: con la prossima presa dati, prevista nel 2018, sarà possibile verificare in modo ancora più preciso questo risultato.

Matteo Serra

Le impronte digitali dell'antimateria

Uno dei problemi aperti della fisica è l'asimmetria tra materia e antimateria: nonostante il big bang ne abbia prodotto uguali quantità, nel cosmo sembra essere rimasta solo la materia ordinaria, mentre di antimateria non c'è quasi traccia. L'esistenza di piccole differenze nella struttura degli atomi di materia e antimateria potrebbe però spiegare l'asimmetria osservata.
Un passo importante in questa direzione è stato fatto dai ricercatori dell'esperimento ALPHA, al CERN di Ginevra, che hanno osservato in dettaglio lo spettro dell'antidrogeno (equivalente di antimateria dell'idrogeno), una sorta di «impronta digitale» dell'elemento. Gli scienziati hanno irradiato con microonde atomi di antidrogeno: una volta colpiti, gli anti-atomi hanno raggiunto uno stato eccitato, emettendo e assorbendo energia a frequenze molto specifiche, e svelando così il loro spettro energetico con una precisione record (le transizioni osservate sono dette infatti «iperfini»).
Le misurazioni, pubblicate su «Nature» da Jeffrey S. Hangst dell'Università di Aarhus in Danimarca e colleghi, coincidono con quelle delle equivalenti linee energetiche dell'idrogeno: ciò significa che se esiste una differenza tra materia e antimateria, saranno necessarie misure ancora più raffinate per rivelarla.

Matteo Serra

RISCALDAMENTO GLOBALE

Un clima mai visto prima

L'aumento della temperatura media della Terra porterà a climi oggi inesistenti sul nostro pianeta

Con il riscaldamento globale in atto stanno cambiando anche altre caratteristiche climatiche, come il ciclo dell'acqua. In Italia si sente parlare, spesso a sproposito, di «tropicalizzazione» del clima nostrano. Significa che in futuro dovremo aspettarci un clima come quello che attualmente si ha ai tropici, per esempio con una ben precisa stagione delle piogge? Ovviamente questo appare alquanto difficile.

In ogni caso, è ovvio che, se il clima che viene previsto dai modelli climatici in una certa area avesse un clima analogo osservato oggi su una diversa zona della Terra, questo sarebbe molto utile: avremmo un chiaro esempio di che cosa potrebbe succedere, soprattutto in termini di impatti su territori, ecosistemi ed esseri umani. Così, Fabienne Dahinden e collaboratori, dell'Institute for Atmospheric and Climate Science dell'ETH di Zurigo, hanno studiato le proiezioni climatiche per i prossimi decenni con l'idea di capire quante zone in futuro sperimenteranno climi che attualmente non sono osservati in altre parti del pianeta.

I risultati, pubblicati su «Environmental Research Letters», hanno mostrato che, mentre la maggioranza delle zone terrestri risentiranno di climi per cui esiste oggi un analogo in un'altra zona della Terra, alcune aree specifiche sperimenteranno climi nuovi e attualmente non presenti sul pianeta, e di cui, quindi, non conosciamo gli impatti. In particolare, usando un insieme di 35 modelli diversi e analizzando l'intero ciclo climatico annuale, i ricercatori dell'istituto svizzero hanno trovato che alcuni climi attuali scompariranno, come quello polare artico, mentre ne compariranno di nuovi, specie nelle zone tropicali e sub-tropicali.

La quantità di terre emerse che sperimenterà un clima nuovo dipenderà dall'aumento di temperatura globale: andrà dal 15 per cento del totale per un aumento di 1,5°C fino a circa il 40 per cento per un aumento di 4°C. In questi casi non avremo esempi di climi passati e relativi impatti e dunque ci troveremo di fronte a inedite preoccupanti novità.

Antonello Pasini

Rasica/iStock (*montagna*); Bobbushphoto/iStock (*Antartide*)

Vincitori e perdenti del primo esperimento di riscaldamento degli oceani

Nessun modello e nessun algoritmo. Per studiare gli effetti del cambiamento climatico sugli ecosistemi marini i ricercatori della British Antarctic Survey hanno letteralmente riscaldato una porzione di oceano al largo della base Rothera, nella Penisola antartica, per nove mesi.

I risultati di quello che è già stato definito il più vasto esperimento di riscaldamento oceanico realizzato sul posto, sono stati pubblicati su «Current Biology». I ricercatori hanno posato a contatto con il fondale marino dei pannelli termici in grado di riscaldare un sottile strato di acqua dello spessore di circa due millimetri. La progettazione dell'esperimento ha previsto tre diversi scenari, ritenuti probabili secondo gli attuali modelli previsionali. Nel primo, l'acqua è stata riscaldata di 2°C rispetto alla temperatura ambiente, simulando le proiezioni al 2100; nel secondo scenario, l'incremento era limitato a 1°C, come indicato dalle stime al 2050; nel terzo, che fungeva da controllo, i pannelli non sono stati alimentati.

Se nel primo scenario le risposte degli organismi sono state estremamente variabili, il secondo ha comportato una drastica riduzione della diversità e dell'equilibrio complessivo della comunità bentonica, cioè legata più o meno direttamente al fondo marino. I ricercatori hanno osservato il collasso della specie dominante, l'invertebrato incrostante *Fenestrulina rugula*, in favore del verme *Romanchella perrieri*, la cui taglia media è aumentata del 70 per cento. «Sono piuttosto sorpreso, non mi aspettavo che un aumento di appena 1°C provocasse un sconvolgimento simile nella comunità bentonica», ha commentato il biologo Gail Ashton.

Secondo gli autori, questi risultati sanciscono che gli effetti del cambiamento climatico sugli ecosistemi marini polari saranno più bruschi di quanto previsto: a differenza degli organismi delle regioni temperate, adattati alla variabilità stagionale, quelli dell'Oceano Antartico si sono evoluti in un ambiente in cui la cui variabilità termica è estremamente ridotta, prospettandosi così come vittime designate di un pianeta che si riscalda inesorabilmente.

Davide Michielin

Ricordiamoci di salvare l'Italia.

Tutto il mondo ammira le nostre bellezze. Noi le proteggiamo con il tuo aiuto.

Iscriviti

per tutto il mese
di ottobre puoi iscriverti
al FAI online
risparmiando 10 euro
su tutte le quote.

Partecipa

alla Giornata FAI d'Autunno.
Il 15 ottobre riscopri l'Italia
con i giovani del FAI.
Cerca gli itinerari su
www.giornatefai.it o scarica l'app.

Scopri

tutte le iniziative promosse
dalle aziende partner
della campagna.
Scopri i dettagli su
www.aziendeperilfai.it

FAI

www.fondoambiente.it

EVOLUZIONE

L'antenato di tutti i fiori

Avrebbe avuto una simmetria radiale e molteplici organi sia maschili sia femminili

Charles Darwin definì «mistero abominevole» la fulminea comparsa, 140 milioni di anni fa, delle piante con fiori, ovvero le angiosperme: una delle innovazioni evolutive più vincenti e allo stesso tempo enigmatiche nella storia della vita. I fossili noti infatti non ci dicono quasi nulla delle forme originarie da cui queste discendono. A colmare parzialmente la lacuna giunge un'analisi statistica, pubblicata su «Nature Communication» da Hervé Sauquet dell' Université Paris-Sud e colleghi, che ha ricostruito in dettaglio il probabile aspetto dell'antenato comune di tutti i fiori.

Il progetto eFLOWER, che ha raccolto più di 13.000 caratteristiche di 792 specie di fiori, ricostruendo l'albero filogenetico delle angiosperme dalle sequenze di DNA, è andato a ritroso con metodi matematici, ricostruendo via via fiori sempre più antichi fino a ottenere un plausibile antenato comune. Ne emerge un fiore a simmetria radiale, dotato di più di dieci tepali (l'equivalente dei petali, non ancora distinti dai sepali, che costituiscono il calice del fiore) con molteplici organi maschili e femminili. Le varie parti si irradiavano da numerosi verticilli sovrapposti, non a spirale, come invece si pensava accadesse nei fiori primitivi. L'immagine ricorda una magnolia, ma in realtà nessun fiore contemporaneo presenta questo miscuglio di caratteristiche: ciò implica che tutte le angiosperme odierne, anche quelle considerate più primitive come le ninfee, sono state riplasmate dall'evoluzione.

Probabilmente questa architettura ridondante era un'eredità delle piante da cui i fiori hanno avuto origine piuttosto che una solida soluzione funzionale. Dopo la loro comparsa, la struttura dei fiori è diventata più compatta, riducendo il numero di vertici da cui si dipartono i petali e altri organi, guadagnando in specializzazione, coesione tra i vari organi e complessità. Un quadro da rivedere se venissero alla luce nuovi fossili: intanto Darwin forse oggi troverebbe meno «abominevole» l'enigma all'origine di uno dei più incantevoli risultati dell'evoluzione.

Massimo Sandal

Le origini della omeotermia

Da quanto tempo esistono gli animali «a sangue caldo»? Non c'è accordo unanime tra gli scienziati. Ma uno studio effettuato da Kévin Rey dell'Università di Lione e colleghi, pubblicato su «eLife», fornisce nuovi indizi. Analisi effettuate su 90 fossili rivelano che questa caratteristica comparve per la prima volta nei terapsidi, rettili simili ai mammiferi, durante il tardo Permiano, tra 259 e 252 milioni di anni fa. Oggi solo uccelli e mammiferi possono produrre il proprio calore corporeo (endotermia) e mantenerlo stabile (omeotermia). Ma questa capacità fu acquisita molto precocemente e in modo indipendente da vari gruppi di rettili.

Per scoprire l'origine dell'endo-omotermia, i ricercatori hanno confrontato il rapporto tra due isotopi stabili dell'ossigeno in denti e ossa fossili di 22 specie di terapsidi e altri tetrapodi coevi non terapsidi, provenienti da vari paesi. Poiché la presenza dei due isotopi varia con il metabolismo dell'animale, si è potuto stabilire che otto specie di due diverse linee di terapsidi, i dicinodonti e i cinodonti, erano endo-omeoterme. Fu forse questa caratteristica a salvarli dalla devastante estinzione di massa del Permiano, 252 milioni di anni fa. Una fortuna per noi, visto che dai cinodonti discendono tutti i mammiferi.

Eugenio Melotti

metinkiyak/iStock

BIOLOGIA

Agli inizi della fotosintesi delle piante

La simbiosi tra un cianobatterio e una cellula eucariote si instaurò quasi due miliardi di anni fa

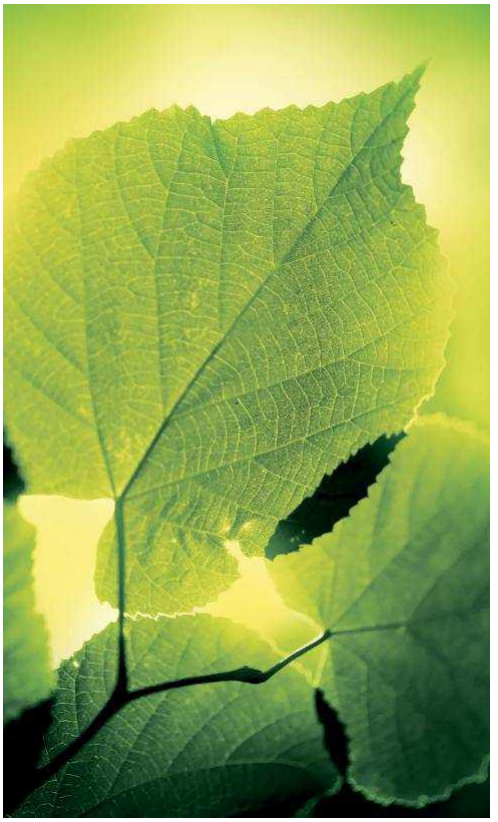
È una delle simbiosi più antiche e fortunate della storia della vita, un singolo evento senza il quale la Terra sarebbe stata radicalmente diversa: l'acquisizione di un cianobatterio, capace di fotosintesi, da parte della primitiva cellula eucariote da cui derivò il regno delle piante.

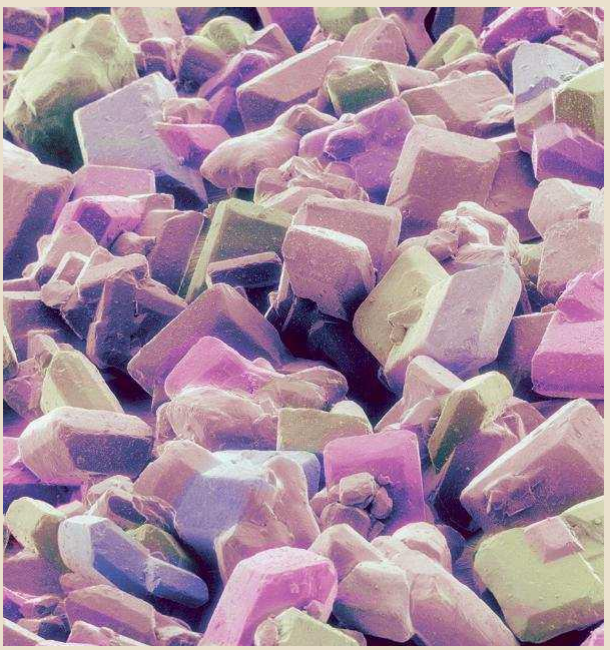
La fotosintesi alimenta la biosfera; gli organismi che possiedono i cloroplasti, organulo caratteristico delle cellule vegetali, sfruttano la luce del Sole per fissare l'anidride carbonica in carboidrati, rilasciando al contempo ossigeno nell'atmosfera. Tuttavia, sebbene la teoria endosimbiontica sia oggi accettata come un fatto verificato, non sono ancora chiari quando e dove questo cianobatterio fu fagocitato dalla cellula primordiale, dando origine al cloroplasto.

Un articolo pubblicato sui «Proceedings of the National Academy of Sciences» da ricercatori dell'Università di Bristol, coordinati dal professore di filogenomica Davide Pisani, getta luce sull'origine dell'organello. I ricercatori hanno setacciato il genoma di 119 tra cianobatteri e organismi eucarioti fotosintetizzanti, includendo inoltre 18 calibrazioni fossili. Le analisi di filogenomica e di orologio molecolare, una tecnica che ricorre a un approccio statistico per stimare il tempo trascorso dalla separazione tra due specie, hanno dimostrato che la linea dei cloroplasti si divise oltre 2,1 miliardi di anni fa da quella di *Gloeomargarita*, il più antico genere di cianobatteri con essi imparentato.

Secondo gli autori, dovettero però trascorrere circa 200 milioni di anni prima che si instaurasse tra i due organismi una vera e propria relazione simbiotica. Il processo avvenne in ambienti a bassa salinità; infatti, i gruppi marini di alghe si separarono molto più tardi, circa 850-650 milioni di anni fa. «I risultati suggeriscono che organismi complessi come le alghe si siano evoluti in ambienti di acqua dolce e solo in un secondo momento abbiano colonizzato il mare», ha commentato Patricia Sánchez-Baracaldo, prima autrice dell'articolo.

Davide Michielin





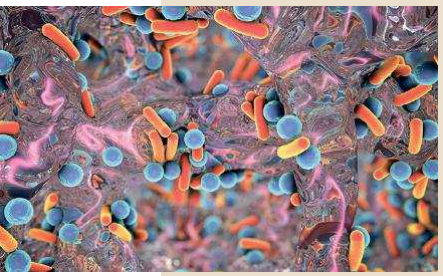
Jeja/iStock (*foglia*); SPL/AGF (*cristalli di zucchero*)

Zuccheri sotto ghiaccio, precursori della vita

La gluconeogenesi, cioè la sintesi degli zuccheri, uno dei pilastri del metabolismo degli esseri viventi, forse esisteva in climi gelidi agli albori della vita o persino prima. Una reazione essenziale di questo percorso metabolico, la sintesi di una forma di fruttosio da precursori più semplici, può avvenire in assenza di enzimi in ghiaccio a temperature di -20 C°, secondo uno studio pubblicato sui «Proceedings of the National Academy of Sciences» da Christoph B. Messner dell'Università di Cambridge. Freddo e ghiaccio permettono alla reazione di procedere lentamente, concentrando i reagenti ed evitando che si degradino. Studi precedenti avevano mostrato che molte reazioni biochimiche potevano avvenire già nella Terra primordiale in assenza di enzimi o cellule, a volte proprio protette dal ghiaccio, ma finora non si trattava di reazioni cataboliche, ovvero che «costruiscono», come la sintesi degli zuccheri. La formazione di fruttosio accelera in presenza di glicina o lisina, indicando che questi amminoacidi possono essere i precursori degli enzimi odierni. Un ulteriore indizio di come nelle vie biochimiche dei viventi odierni riverberino i «fossili» di un'antica chimica prebiotica, sorta in ambienti ricchi di gradienti termici e chimici come le sorgenti idrotermali in regioni fredde.

Massimo Sandal

Il microbioma sconosciuto



Nel nostro corpo le cellule batteriche sono più numerose di quelle umane, ma il loro ruolo in svariate funzioni superiori è un'incognita, come anche la carta di identità. Secondo uno studio pubblicato sui «Proceedings of the National Academy of Sciences» da Stephen Quake della Stanford University, oltre il 99 per cento dei frammenti di DNA circolanti nel sangue è di organismi sconosciuti.
Alla ricerca di marcatori molecolari per sviluppare tecniche meno invasive della biopsia nel prevedere il rigetto degli organi, gli autori hanno analizzato il DNA circolante di 1351 campioni ematici prelevati da 188 pazienti trapiantati. Il confronto di queste sequenze con quelle nelle banche dati ha evidenziato che il 99 per cento del DNA non coincideva con nessuna delle forme di vita note. La maggioranza delle sequenze ignote è risultata appartenere a nuove specie di Proteobacteria, un phylum di batteri che comprende, tra gli altri, *Escherichia* e *Salmonella*. Ma non solo: l'analisi ha raddoppiato il numero dei cosiddetti TTV finora conosciuti, virus trasmessi per via trasfusionale frequenti in soggetti immunodepressi. Una conferma che il nostro microbioma è un universo che abbiamo appena iniziato a esplorare.(**DaMi**)

Anche gli scimpanzé si ammalano di Alzheimer

Uno dei problemi dello studio dell'Alzheimer è che la malattia è esclusivamente umana: addirittura i topi usati nelle ricerche simulano solo i segni della malattia grazie a modifiche genetiche, con il risultato che spesso le terapie che sembrano funzionare per loro poi deludono nell'essere umano. Adesso, però, le cose potrebbero cambiare: anche gli scimpanzé mostrano i segni cerebrali dell'Alzheimer. Lo ha scoperto la neurologa Melissa Edler, della Northeast Ohio Medical University, esaminando 20 cervelli di scimpanzè morti fra i 32 e i 67 anni.

Come si legge su «Neurobiology of Aging», Edler ha scoperto in 12 di quei cervelli, in particolare nella corteccia frontale e nell'ippocampo, i centri più danneggiati dall'Alzheimer, placche di proteina beta amiloide fra le cellule e noduli di proteina tau nei neuroni. Si tratta dei segni tipici di quella demenza, tanto più diffusi quanto più anziano era l'animale, come per l'essere umano. Non si sa però se negli scimpanzé quelle alterazioni provochino anche un declino cognitivo, certo è che non si sono osservati fra loro casi di demenza gravi come quelli umani. «Capire che cosa renda il nostro cervello più sensibile all'Alzheimer di quello dello scimpanzé potrà aiutarci a individuare nuove linee terapeutiche e preventive», ha spiegato Edler. (**AlSa**)

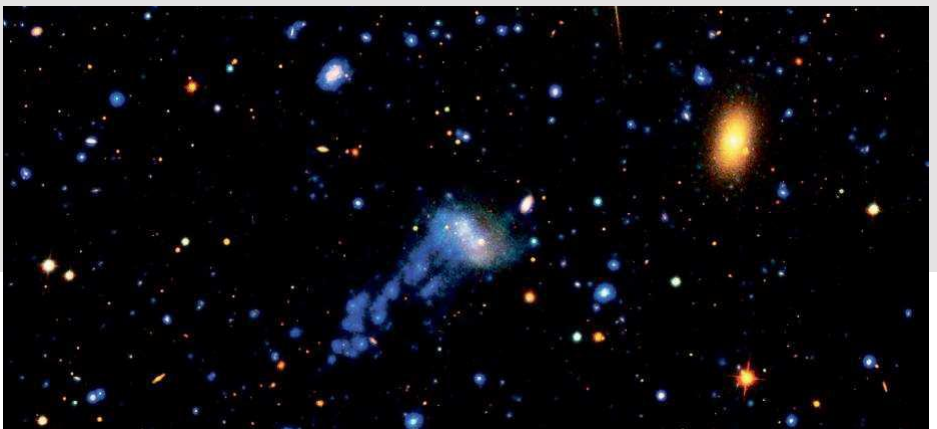
Geni minoici e micenei

Uno studio pubblicato su «Nature» da Iosif Lazaridis della Harvard Medical School e colleghi fa luce sulle parentele di Minoici e Micenei, le civiltà fiorite a Creta e nella Grecia continentale durante l'Età del bronzo, tra il 3000 e il 1050 a.C.. I ricercatori hanno analizzato campioni di DNA antico da ossa e denti di 19 individui sepolti in tombe e altri siti in tutto l'Egeo. Di questi, 10 erano minoici, 4 micenei, 3 venivano dall'Anatolia sud-occidentale, in Turchia, uno da Creta dopo l'arrivo dei Micenei, e il più antico risaliva al 5400 a.C., cioè al Neolitico. I campioni sono stati confrontati con altri 332 genomi antichi e 2616 moderni, inclusi due cretesi.

I risultati suggeriscono che Minoici e Micenei discendono per tre quarti dai primi agricoltori del Mar Egeo, diffusi in Anatolia, Grecia e isole greche. Ma vi sono parentele anche con i popoli del Caucaso e dell'Iran. Inoltre, solo il genoma dei Micenei mostra affinità coi popoli delle steppe, a nord del Mar Nero e del Mar Caspio. (**EuMe**)

Galassie medusa e nuclei galattici attivi

Una delle questioni irrisolte relative ai buchi neri supermassicci presenti al centro di quasi tutte le galassie è perché solo uno su dieci riesca a dare origine a un nucleo galattico attivo. Adesso, un gruppo guidato da Bianca Poggianti dell'Istituto nazionale di astrofisica – Osservatorio astronomico di Padova, ha individuato un meccanismo che potrebbe innescare l'attività del buco nero, causata dalla caduta di materia proveniente dal disco di accrescimento che appunto avvolge il buco nero.
Impiegando il Very Large Telescope dell'European Southern Observatory in Cile, il gruppo ha studiato alcune «galassie medusa», così chiamate a causa dei lunghi tentacoli di gas ionizzato che si estendono molto oltre lo spessore del disco galattico. Le galassie medusa si trovano solo negli ammassi di galassie: è il loro moto attraverso il gas intergalattico a produrre la «pressione d'ariete» capace di strappare questo gas dalla galassia (*ram pressure stripping*). Come si legge su «Nature», nelle galassie medusa osservate, ben 6 su 7 hanno il nucleo galattico attivo. Una percentuale troppo alta per essere un caso. Da qui l'ipotesi che lo stesso fenomeno che dà origine ai tentacoli possa anche innescare il nucleo attivo, come se parte del gas, invece di venire strappato dal disco, fosse dato in pasto al buco nero. Intanto il gruppo prosegue lo studio di altre galassie medusa. (**EmRi**)



Dr_Microbe/iStock (*illustrazione batteri*); Grafissimo/iStock (*pittura minoica*); cortesia NASA/JPL-Caltech (*galassia medusa*)

Robot come origami

Tra i nuovi tipi di robot che emergono dai laboratori, gli «*origami*» sono forse i più originali. Sono creati con materiali leggeri e sottili, piegati in modo da ottenere geometrie variabili che consentono movimenti particolari.

Aimy Wissa e colleghi dell'Università dell'Illinois a Urbana-Champaign hanno di recente messo a punto un particolare robot origami, descritto su «Smart Materials and Structures», strutturato come una sorta di manica a sezione poligonale e con uno sviluppo a chiocciola. Grazie a questa configurazione, espandendosi e contraendosi il robot è in grado di simulare il movimento di un serpente. La curiosità è che questo «oribot» è stato ottenuto da un foglio piatto di materiale seguendo una tecnica che, secondo i ricercatori che lo hanno creato, «apre nuove possibilità tutte da esplorare nello sviluppo di robot utilizzabili in scenari in cui l'essere umano non può essere presente e con un sistema di locomozione integrato e a basso costo». (RiOl)

Osservata la diffusione coerente dei neutrini

Fino a oggi le uniche osservazioni del passaggio di un neutrino in un rivelatore sono state permesse dall'interazione debole di questa sfuggente particella elementare con un singolo nucleone, protone o neutrone, di un nucleo atomico. Ma ora il gruppo di ricercatori della collaborazione Coherent, guidata da Dmitri Akimov, dell'Istituto di fisica teorica e sperimentale di Mosca, è finalmente riuscito a osservare una nuova modalità di interazione fra neutrino e nucleo atomico, prevista teoricamente già nel 1974, ma sempre sfuggita alle osservazioni. Si tratta della diffusione elastica coerente dei neutrini da parte dei nuclei atomici, ovvero dell'interazione diretta di un neutrino con l'intero nucleo atomico e non con un singolo nucleone. In particolari circostanze, un neutrino di bassa energia può «sentire» la carica debole dell'intero nucleo e generare la diffusione coerente.

Come spiegano su «Science», Akimov e colleghi hanno impiegato il più piccolo rivelatore di neutrini esistente al mondo, uno scintillatore di appena 14,5 chilogrammi, installato presso l'Oak Ridge National Laboratory e pronto a raccogliere i neutrini emessi dalla Spallation Neutron Source. Adesso i fisici hanno un nuovo importante strumento per studiare il comportamento dei neutrini. (EmRi)

Più comuni gli eventi meteo estremi in Europa

Entro il 2100 gli eventi meteo estremi diventeranno così comuni in Europa da coinvolgere 15 volte più persone di oggi e causando ogni anno 50 volte il numero dei decessi che provocano oggi.
La stima arriva da un gruppo di ricercatori dell'European Commission Joint Research Centre di Ispra, vicino a Varese, diretti dall'idrologo Giovanni Forzieri, ed è stata pubblicata su «The Lancet Planetary Health».
I ricercatori hanno analizzato 2300 disastri meteo avvenuti in Europa fra il 1981 e il 2010, stimando poi come la loro frequenza e diffusione dovrebbe aumentare secondo il modello climatico *business as usual*, cioè in assenza di interventi per limitare le emissioni.
Incrociando i risultati con l'evoluzione della demografia nel continente, i ricercatori hanno concluso che, se non saranno presi provvedimenti per mitigare i danni, nel 2100 gli europei a «rischio meteo» saliranno dai 25 milioni di oggi a 375 milioni, vale a dire due europei su tre, con 152.000 morti all'anno causati da eventi meteo estremi contro i 3000 attuali.

La grande maggioranza di quei decessi sarà dovuta alle ondate di calore, che oggi ne provocano 2700. In crescita, anche se molto minore, le morti per incendi, trombe d'aria, allagamenti costieri e alluvioni fluviali, in calo, invece, quelle dovute al freddo. Il cambiamento climatico sarà responsabile del 90 per cento delle variazioni stimate nei decessi, con il resto legato alla maggiore urbanizzazione. (AlSa)

Un'analisi per usare gli antibiotici

Le infezioni dell'apparato respiratorio sono un grattacapo. Con gli attuali test diagnostici è complicato escludere una causa batterica e per cautela i medici prescrivono antibiotici pur sapendo che l'infezione potrebbe essere virale (gli antibiotici non debellano i virus e assumerli quando non serve aumenta il rischio di sviluppare resistenza). Per questo lo studio pubblicato su «Scientific Reports» da Ann R. Falsey dell'Università di Rochester e colleghi fa ben sperare: nel sangue di 94 pazienti con infezioni respiratorie sono

stati individuati 11 marcatori genetici che permettono di distinguere tra infezioni batteriche e virali.
I ricercatori hanno eseguito un'analisi microbiologica per determinare la causa dell'infezione, poi hanno prelevato campioni di sangue «centrifugandolo» per isolare e analizzare i frammenti di RNA presenti (in risposta ai patogeni, le cellule sintetizzano proteine «traducendo» i geni fatti di DNA in RNA). Così hanno individuato i marcatori, diversi perché diversa è la risposta delle cellule, e quindi i geni trascritti, a virus e batteri.
I ricercatori hanno ricevuto un finanziamento per sviluppare un test del sangue che, rilevando i marcatori presenti, accerti l'origine batterica dell'infezione. (MaSa)

Izabelite/iStock (*origami*); zneb076/iStock (*antibiotici*); Francesco Fotia/AGF (*autobus a Roma*)

ASTRONOMIA

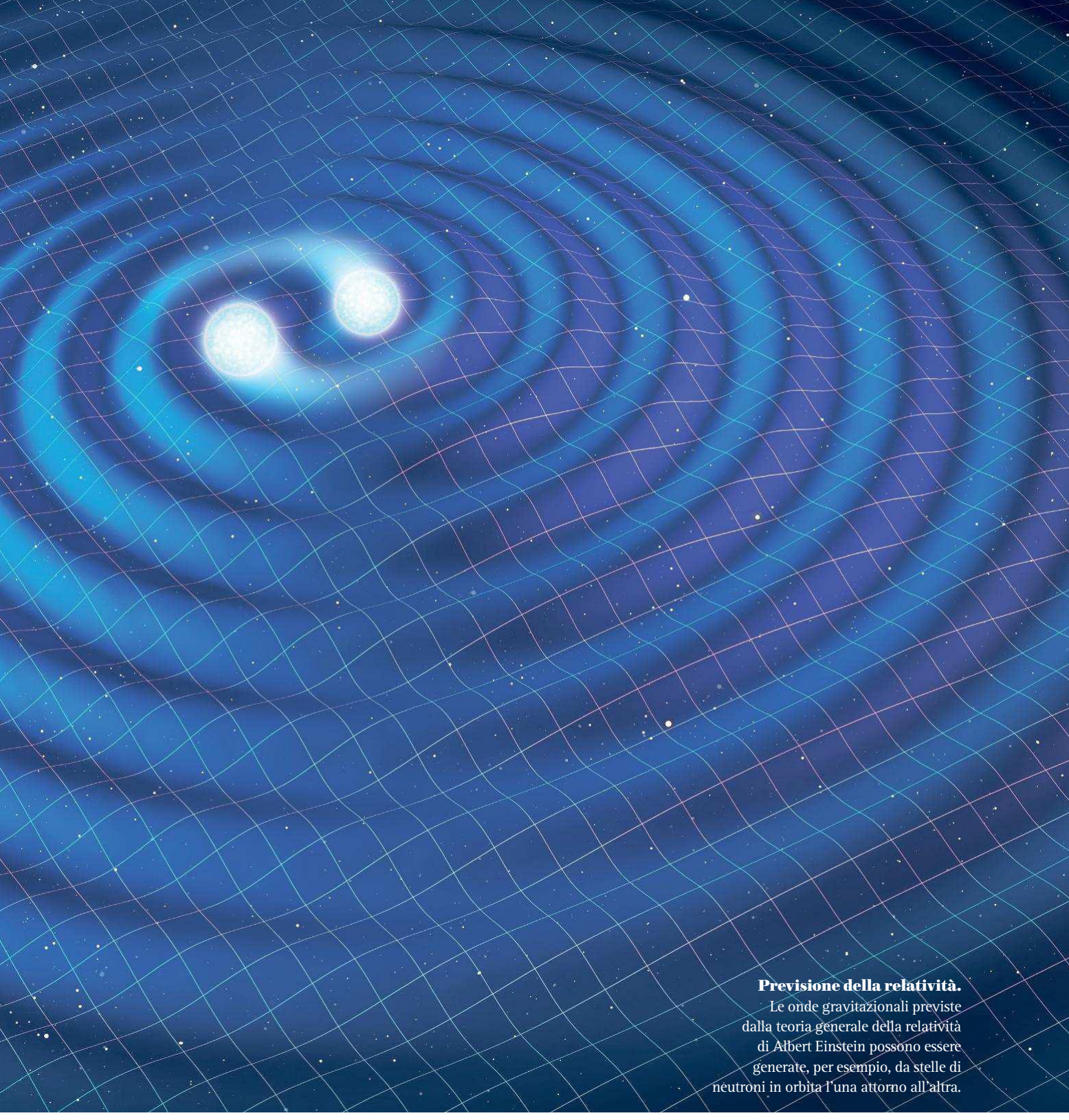
L'era delle onde gravitazionali

La prima rilevazione diretta delle increspature dello spazio-tempo previste oltre cent'anni fa da Albert Einstein ha aperto le porte a una nuova era per la conoscenza dell'universo

di Giovanni Losurdo e Fulvio Ricci

Il 1° agosto 2017, dopo sei anni di interruzione dedicati ad aggiornamenti tecnologici, l'interferometro Virgo per onde gravitazionali costruito vicino a Pisa ha iniziato di nuovo a registrare dati, unendosi ai due rivelatori statunitensi LIGO. Al termine del periodo di osservazione le due collaborazioni hanno annunciato che «alcuni promettenti candidati-eventi sono stati identificati nei dati di LIGO e Virgo nell'analisi preliminare».

Mark Garlick/Science Photo Library/ Getty Images



Previsione della relatività. Le onde gravitazionali previste dalla teoria generale della relatività di Albert Einstein possono essere generate, per esempio, da stelle di neutroni in orbita l'una attorno all'altra.

Con l'ingresso di Virgo hanno preso il via le operazioni della rete mondiale di tre rivelatori di onde gravitazionali di seconda generazione in grado di localizzare nel cielo le sorgenti di queste perturbazioni del campo gravitazionale. Questa informazione, trasferita prontamente agli osservatori astronomici a Terra e ai satelliti nello spazio, permette di studiare i fenomeni cosmici in un modo nuovo; nasce dunque un'astronomia basata sull'osservazione della stessa sorgente attraverso messaggeri differenti e complementari: onde elettromagnetiche, onde gravitazionali e neutrini, particelle elementari che interagiscono debolmente con la materia. Se il 2015 è ricordato come l'anno della prima rivelazione diretta delle onde gravitazionali e della nascita dell'astronomia gravitazionale, il 2017 è l'anno di inizio della astronomia multimessaggera.

Stiamo dunque vivendo un'epoca paragonabile a quella di Galileo Galilei, che per primo osservò il cielo con il cannocchiale. È un momento storico, che giunge quattro secoli dopo il *Sidereus Nuncius* galileiano, un secolo dopo la previsione di Albert

Einstein dell'esistenza delle onde gravitazionali, dieci anni dopo l'accordo tra i due interferometri statunitensi LIGO e Virgo, che ha posto le basi per la creazione di una rete mondiale.

In questo articolo ripercorriamo le tappe principali di una straordinaria avventura scientifica che si è svolta per decenni tra lo scetticismo generale e che l'11 febbraio 2016, con l'annuncio della prima rivelazione, ha avuto un grande impatto nell'immaginario collettivo.

Giovanni Losurdo è primo ricercatore dell'Istituto nazionale di fisica nucleare (INFN), sezione di Pisa. Ha guidato il progetto Advanced Virgo dalla sua approvazione, nel 2009, fino alla conclusione, il 1° agosto 2017, con l'inizio della presa dati di Virgo.

Fulvio Ricci è professore alla «Sapienza» Università di Roma e ricercatore dell'INFN, sezione di Roma. Dal 1995 è nella collaborazione internazionale Virgo, di cui è stato portavoce dal 2014 al 2017.

Dall'alto. L'interferometro Virgo, costruito nella campagna toscana nel Comune di Cascina, vicino a Pisa, con i due caratteristici bracci azzurri, lunghi tre chilometri ciascuno.

Il lungo cammino verso la scoperta

L'ipotesi secondo cui l'interazione gravitazionale possa propagarsi con una velocità finita è antica. Risalendo nel tempo fino al 1776, troviamo in *Sur le Principe de la Gravitation Universelle* del francese Pierre-Simon Laplace l'idea che il campo gravitazionale potesse essere rappresentato come un fluido velocissimo emesso dal centro di gravità. Tuttavia la derivazione matematica dell'esistenza delle onde gravitazionali, conseguente all'enunciato di una teoria completa della gravità, è frutto del lavoro di Einstein presentato nel 1915 alla Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften e pubblicato a Berlino il 22 giugno 1916. Ma solo alla fine degli anni cinquanta è diventato chiaro che l'onda gravitazionale non è solo il risultato di un artificio matematico senza alcuna rispondenza con la realtà fisica.

In questo nuovo quadro teorico è nata l'idea del fisico statunitense Joe Weber di usare un cilindro metallico (o «barra») come rivelatore di onde gravitazionali. Weber aveva pubblicato lavori grazie ai quali era stata inaugurata la fase di sperimentazione con l'obiettivo di osservare segnali brevi, circa un millisecondo, emessi in collassi di supernove; aveva annunciato la rilevazione di segnali in coincidenza tra due antenne lontane, ma i suoi risultati erano stati poi confutati da altri gruppi che avevano applicato lo stesso metodo sperimentale. Poiché il rivelatore a barra è limitato dal rumore termico, all'inizio degli anni settanta il fisico statunitense William Fairbank, della Stanford University, aveva realizzato una barra raffreddata a temperatura ultrabassa (10 millikelvin, poco al di sopra dello zero assoluto), o criogenica. Tempo dopo Bill Hamilton in Louisiana, ed Edoardo Amaldi e Guido Pizzella in Italia, avevano costruito altre antenne criogeniche: Allegro, installata negli Stati Uniti, ed Explorer, installata al CERN di Ginevra. Nel 1989 le tre antenne avevano operato per la prima volta in coincidenza, costituendo il primo esempio di rete internazionale per la rilevazione delle onde gravitazionali. In Italia saranno poi realizzate altre due antenne criogeniche: Nautilus a Frascati, vicino a Roma, e Auriga a Legnaro, vicino a Padova.

In quegli stessi anni l'idea della rilevabilità delle onde gravitazionali si era consolidata definitivamente grazie all'osservazione nelle onde radio del decadimento orbitale della prima pulsar binaria scoperta, nota come PSR B1913+16; le pulsar sono stelle compatte che emettono onde radio con una variabilità regolare, un sistema binario è composto da due pulsar che ruotano assai vicine una attorno all'altra. La scoperta di PSR B1913+16, avvenuta nel 1974, era poi valsa nel 1993 il Nobel per la fisica agli statunitensi Russell Hulse e Joseph Taylor, anche perché aveva «aperto nuove possibilità nello studio della gravitazione», come recitava la motivazione del premio.

Sempre negli anni settanta era emerso un approccio alternativo ai cilindri di Weber: usare la luce attraverso l'interferometria, ovvero i fenomeni di interferenza della luce, per monitorare il movimento relativo di specchi in caduta libera (*si veda il box a p. 35*); in questo modo era possibile realizzare un rivelatore interferometrico a larga banda, in grado cioè di rilevare non solo i segnali di brevissima durata delle supernove, ma anche i segnali di sorgenti periodiche, come le stelle di neutroni rotanti, quasi-periodiche, come due stelle di neutroni o buchi neri legati in un sistema binario che finiscono per coalescere, o fondersi tra loro, e sorgenti «stocastiche», come il fondo cosmologico di onde gravitazionali, un'eco del big bang.

Il significativo salto di qualità nella definizione della strategia di rilevazione è dovuto al fisico statunitense Rainer Weiss che propose, in un articolo pubblicato nel 1972 su una rivista del Massachusetts Institute of Technology, uno schema di rivelatore interferometrico e ne discusse i principali limiti alla sensibilità. Weiss sarà poi uno dei co-fondatori dell'esperimento LIGO.

Alla fine degli anni settanta e negli anni ottanta, eleganti idee per migliorare la sensibilità degli interferometri erano state sviluppate da Ronald Drever e Brian Meers del gruppo Glasgow in

IN BREVE

Poco più di cent'anni fa Albert Einstein nella sua teoria generale della relatività aveva previsto increspature nel tessuto dello spazio-tempo chiamate onde gravitazionali. Ma solo alla fine degli anni cinquanta è stato chiaro che le onde gravitazionali non erano un artificio matematico.
Le soluzioni adottate nei decenni successivi per rilevare queste increspature hanno portato a interferometri come Virgo, in Italia, e LIGO, negli Stati Uniti.
La prima rilevazione diretta delle onde gravitazionali è avvenuta nel settembre 2015, a opera delle collaborazioni LIGO-Virgo. In seguito sono state rilevati altri eventi simili.
In futuro l'osservazione congiunta di segnali elettromagnetici e gravitazionali porterà all'astronomia multimessaggera, un potente strumento di indagine del cosmo.

Cortesia N. Baldocchi/The Virgo Collaboration

Scozia, da Roland Schilling, Lise Schnupp, Albrecht Ruediger del gruppo di Garching, in Germania, da Alain Brillet e Jean-Yves Vinet a Orsay, in Francia.

Negli anni ottanta, in Italia, Adalberto Giazotto aveva sottolineato l'importanza di mettere a punto un rivelatore sensibile nella gamma delle basse frequenze (10-100 hertz). In questa regione di frequenze, dove è più grande il contributo di segnali da coalescenza di sistemi binari di buchi neri di massa stellare, la limitazione principale è data dal rumore sismico. Fin da subito Giazotto aveva portato avanti l'idea di costruire un dispositivo chiamato «superattenuatore» per ridurre il moto microsismico di un fattore di 10^{-15} alla frequenza di 10 hertz. Parallelamente, Brillet aveva contribuito a ottimizzare il progetto ottico dell'interferometro perorando l'uso di laser a stato solido, che sfruttano un cristallo anziché un gas come mezzo attivo per produrre luce coerente.

Sulla base di questi numerosi contributi, negli anni novanta la caccia alle onde si è concretizzata in pochi progetti principali: LIGO – un sistema di due interferometri, ciascuno con due bracci perpendicolari tra loro e paralleli al terreno, ognuno lungo quattro chilometri – costruiti a Hanford, nello Stato di Washington, e a Livingston, in Louisiana, gestiti da California Institute of Technology e Massachusetts Institute of Technology; Virgo, approvato nel 1994 dall'Istituto nazionale di fisica nucleare (INFN) e dal francese Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), un interferometro con due bracci da 3 chilometri ciascuno, costruito a Cascina, vicino a Pisa e gestito dal 2000 dall'European Gravitational Observatory (EGO); GEO600, con bracci di 600 metri ad Hannover, in Germania, frutto di una collaborazione britannico-tedesca; TAMA, con bracci di 300 metri, in Giappone.

Nel primo decennio di questo secolo LIGO e Virgo hanno firmato un accordo storico per lo scambio e l'analisi congiunta dei dati, e la pubblicazione dei risultati a firma delle due collaborazioni; pur non rilevando le onde gravitazionali, hanno raggiunto le sensibilità di progetto e hanno dimostrato di poter osservare con un elevato ciclo di lavoro. In questo modo, esperimenti nati in competizione uniscono le forze in una scelta strategica ricca di conseguenze: la rete di tre interferometri chilometrici permette di aumentare la credibilità degli eventi rilevati, estendere la copertura del cielo e, soprattutto, localizzare la sorgente. Così si realizza quello che Giazotto aveva già proposto nel 2001: sfruttare i rivelatori come se fossero un'unica macchina, analizzando i dati in modo coerente.

Lo sviluppo dei rivelatori

Nell'aprile 2008 la statunitense National Science Foundation ha approvato il progetto Advanced LIGO, per un budget di oltre 200 milioni di dollari, più i contributi costituiti da parti di apparato fornite da Germania, Regno Unito e Australia. Quasi due anni dopo, nel dicembre 2009, viene approvato Advanced Virgo. Entrambi i progetti hanno l'obiettivo di migliorare la sensibilità dei rivelatori di prima generazione di un fattore dieci e, di conseguenza, consentire l'esplorazione di un volume di cosmo 1000 volte maggiore. LIGO inizia questa fase di costruzione nel 2010 e dopo cinque anni, a settembre 2015, gli interferometri di Hanford e Livingston ricominciano a registrare dati. La sensibilità dei rivelatori nel primo periodo osservativo della seconda generazione migliora quella del 2010 di quasi quattro volte.

Virgo invece prende dati anche nel 2011 e inizia i lavori di installazione di Advanced Virgo nel 2012. Anche per Virgo, come per LIGO, sono stati necessari cinque anni tra l'inizio della costruzione e quello della presa dati.

Le modifiche riguardano quasi tutti gli aspetti dei rivelatori. A cominciare dal disegno ottico dell'interferometro, in cui è stata introdotta una cavità di ricircolo di segnale, in grado di modificare la risposta in frequenza del rivelatore. Inoltre la dimensione del fascio laser che interroga le masse di test è più grande che in passato, permettendo di ridurre l'effetto del rumore termico degli specchi sulla sensibilità.

Da dentro. Uno dei bracci dell'interferometro Virgo, che corre in un tunnel. All'interno della struttura cilindrica orizzontale passa un fascio laser.

In Advanced LIGO è stato installato un nuovo sistema di isolamento sismico per gli specchi che permette di estendere la banda di funzionamento verso le basse frequenze. Advanced Virgo invece continua a usare, con alcune modifiche, i superattenuatori già sperimentati con successo in Virgo.

Un salto in avanti cruciale è stato fatto sulla qualità degli specchi. Rispetto alla prima generazione è ulteriormente migliorata la qualità del materiale usato per le ottiche (che deve avere proprietà estreme di purezza e omogeneità per limitare al massimo l'assorbimento della luce che lo attraversa e le aberrazioni ottiche); ma soprattutto è migliorata la capacità di lavorare le superfici: con le nuove tecniche di levigatura si ottiene una rugosità residua a livello di 0,2 nanometri (paragonabile alle dimensioni di un atomo), quasi un fattore 10 meglio di quello che si sapeva fare quando sono stati prodotti gli specchi di LIGO e Virgo. Sono state migliorate anche qualità e uniformità su larga scala dei *coating,* le «pellicole» che rendono riflettenti i substrati di quarzo sintetico con cui sono stati realizzati gli specchi. Questo permette di usare fasci luminosi più larghi, riducendo il rumore termico e migliorando la sensibilità nella zona centrale della banda, e di ridurre in modo importante la quantità di luce diffusa e l'entità delle aberrazioni introdotte.

I rivelatori *advanced* hanno iniziato le operazioni usando una potenza del laser paragonabile a quella di Virgo e LIGO. È però previsto un incremento progressivo di questa potenza per ridurre la fluttuazione del numero di fotoni che compongono il fascio laser, che limita la sensibilità alle alte frequenze. Per questo Advanced LIGO è stato dotato da subito di un laser a stato solido da 200 watt, mentre Advanced Virgo prevede di installare nei prossimi mesi un laser di potenza maggiore dell'attuale.

La gestione di una potenza luminosa maggiore non è semplice. Innanzitutto introduce un maggior rumore di pressione di radiazione, cioè la pressione sperimentata da un corpo quando è colpito da radiazione elettromagnetica (che si gestisce realizzando specchi più pesanti: le masse di test di Advanced LIGO/Virgo pesano circa 40 chilogrammi, il doppio rispetto alla prima generazione). Ma il problema più complesso riguarda le aberrazioni dovute al riscaldamento degli specchi. Per gestirle è stato progettato un sofisticato sistema attivo di compensazione termica di queste aberrazioni, che usa molteplici sensori ottici e attuatori termici. Lo sviluppo di questo sistema è stato particolarmente curato in Virgo, che ha un disegno ottico delle cavità di ricircolo che lo rende maggiormente sensibile alle aberrazioni rispetto a LIGO. Entrambi gli esperimenti stanno progettando l'installazione di un banco che produce luce «compressa» (*squeezed*), cioè un sistema ottico in grado di ridurre il livello di rumore di quantizzazione della luce anche a parità di potenza del laser. Una particolare cura è stata messa nel mitigare il rischio di luce diffusa, isolando sismicamente e acusticamente tutti i fotodiodi e usando diaframmi assorbitori. In Advanced Virgo è stato anche migliorato il sistema di vuoto, introducendo trappole criogeniche alle estremità dei tubi.

I due interferometri LIGO, nella configurazione avanzata, sono tornati in funzione a settembre 2015 e finalmente il 14 settembre il primo segnale di onda gravitazionale è osservato con un'altissima significatività statistica. Altri due segnali sono stati poi rivelati in seguito, aprendo in via definitiva la nuova era dell'astronomia gravitazionale. Nel prossimo futuro l'accuratezza nella localizzazione degli eventi nel cielo crescerà insieme alla sensibilità dei rivelatori e a nuovi interferometri: KAGRA, in fase di costruzione in Giappone, e il terzo LIGO, in India.

Scoperte recenti

Alla prima osservazione del 14 settembre 2015, dovuta al collasso di un sistema binario di buchi neri, ne sono seguite altre. Nei due cicli di presa dati, durante l'ultimo dei quali si è aggiunto Virgo, il tempo in cui gli interferometri hanno osservato il cielo allo stesso momento è stato di sei mesi e gli eventi finora identificati sono relativi a coalescenza di buchi neri (*si veda il box a p. 36*).

Negli ultimi istanti della fusione le velocità dei due corpi stellari sono prossime a quelle della luce e a fronte di segnali di deformazione degli interferometri così deboli – una variazione relativa di lunghezza dei bracci dell'interferometro pari a 10^{-21} – le energie irradiate in questi processi sono dell'ordine di una massa solare.

L'osservazione di onde gravitazionali di questo tipo conferma le previsioni teoriche che indicavano l'esistenza di buchi neri con

Claudio Giovannini/Stringer/Getty Images

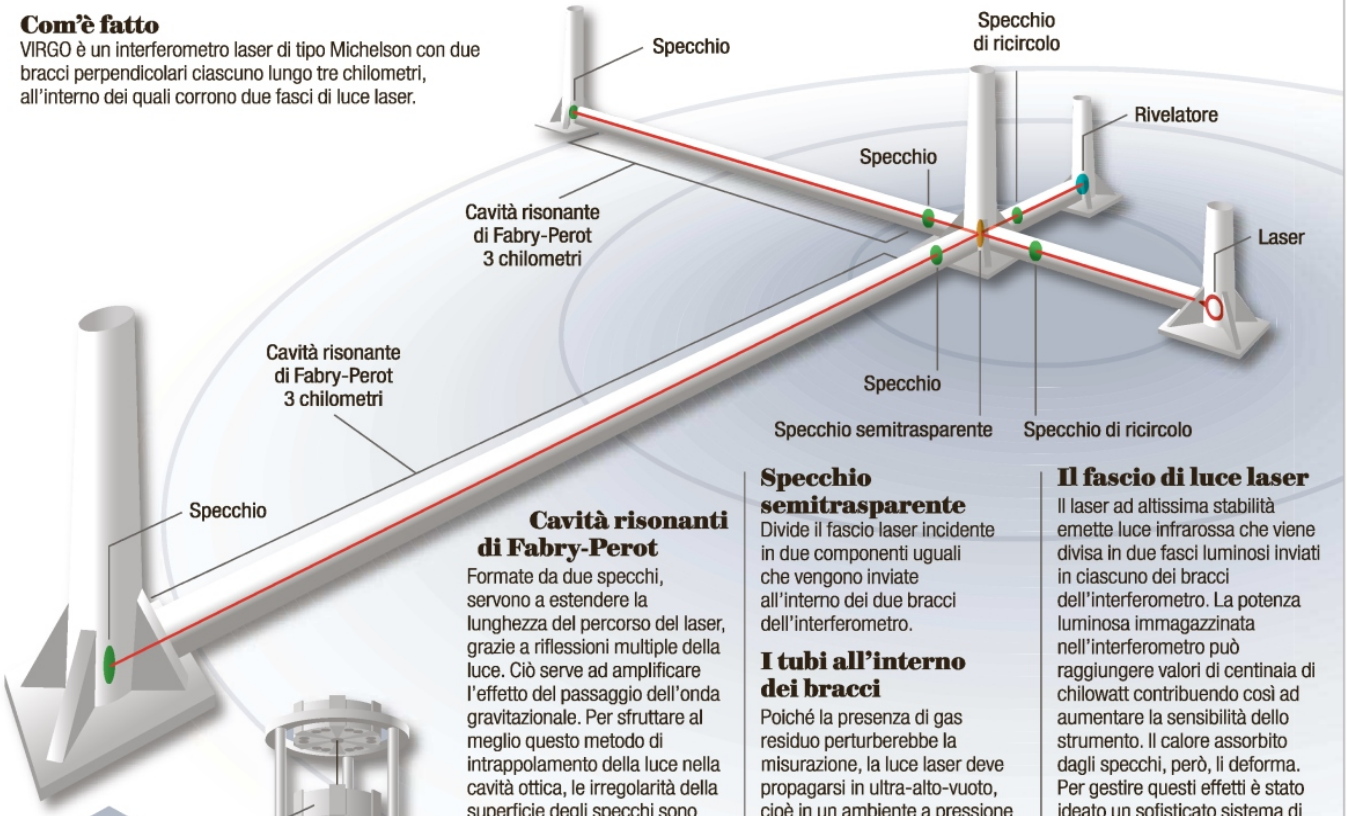
Dentro Advanced Virgo

Nel 1994 la costruzione di Virgo (l'interferometro per rivelare onde gravitazionali realizzato a Cascina, in provincia di Pisa) è approvata dall'Istituto nazionale di fisica nucleare (INFN) e dal francese Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS). A dicembre 2009 è stato approvato Advanced Virgo, un progetto per aggiornare le tecnologie di Virgo e renderlo così un interferometro di seconda generazione, in grado di aumentare di circa 1000 volte il volume di universo osservato.

Il progetto ha coinvolto le agenzie che avevano finanziato Virgo (CNRS e INFN) per 21,8 milioni di euro di investimenti, il laboratorio olandese Nikhef, con un contributo in parti dell'apparato, il consorzio polacco POLGRAW, l'istituto ungherese RMKI, l'Università di Valencia. Complessivamente vi sono stati coinvolti 21 laboratori in sei paesi europei, per un totale di circa 280 persone, compreso EGO, il consorzio cofinanziato da INFN e CNRS che gestisce il sito di Cascina. In Italia sono nove i laboratori dell'INFN che hanno partecipato: Firenze/Urbino, Genova, Napoli, Padova, Perugia, Pisa, Roma, Tor Vergata, Trento (TIFPA). I laboratori INFN hanno ricoperto responsabilità rilevanti occupandosi in particolare di: superattenuatori, payload (stadio finale di sospensione e controllo dello specchio), sospensioni di quarzo fuso per le masse di test, sistema di compensazione termica delle aberrazioni, criogenia, sistema di monitoraggio ambientale.

Com'è fatto

VIRGO è un interferometro laser di tipo Michelson con due bracci perpendicolari ciascuno lungo tre chilometri, all'interno dei quali corrono due fasci di luce laser.



Cavità risonanti di Fabry-Perot

Formate da due specchi, servono a estendere la lunghezza del percorso del laser, grazie a riflessioni multiple della luce. Ciò serve ad amplificare l'effetto del passaggio dell'onda gravitazionale. Per sfruttare al meglio questo metodo di intrappolamento della luce nella cavità ottica, le irregolarità della superficie degli specchi sono ridotte a frazioni di nanometro.

Specchio semitrasparente

Divide il fascio laser incidente in due componenti uguali che vengono inviate all'interno dei due bracci dell'interferometro.

I tubi all'interno dei bracci

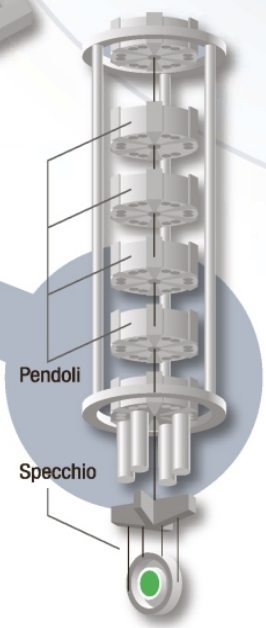
Poiché la presenza di gas residuo perturberebbe la misurazione, la luce laser deve propagarsi in ultra-alto-vuoto, cioè in un ambiente a pressione di 10^{-12} atmosfere.

Il fascio di luce laser

Il laser ad altissima stabilità emette luce infrarossa che viene divisa in due fasci luminosi inviati in ciascuno dei bracci dell'interferometro. La potenza luminosa immagazzinata nell'interferometro può raggiungere valori di centinaia di chilowatt contribuendo così ad aumentare la sensibilità dello strumento. Il calore assorbito dagli specchi, però, li deforma. Per gestire questi effetti è stato ideato un sofisticato sistema di compensazione termica.

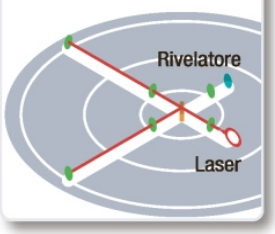
I super-attenuatori

Per evitare che movimenti del terreno li facciano vibrare, gli specchi sono sospesi a un sistema di isolamento sismico: ammortizzatori collegati in fila come una catena di pendoli.

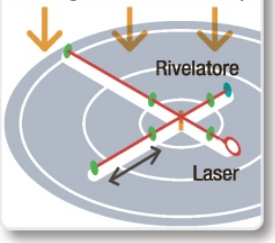


Come funziona l'interferometro

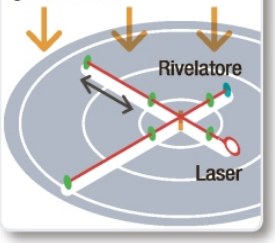
I due fasci di luce laser, provenienti dai bracci, vengono poi ricombinati (in opposizione di fase) in maniera che non arrivi luce nel rivelatore.



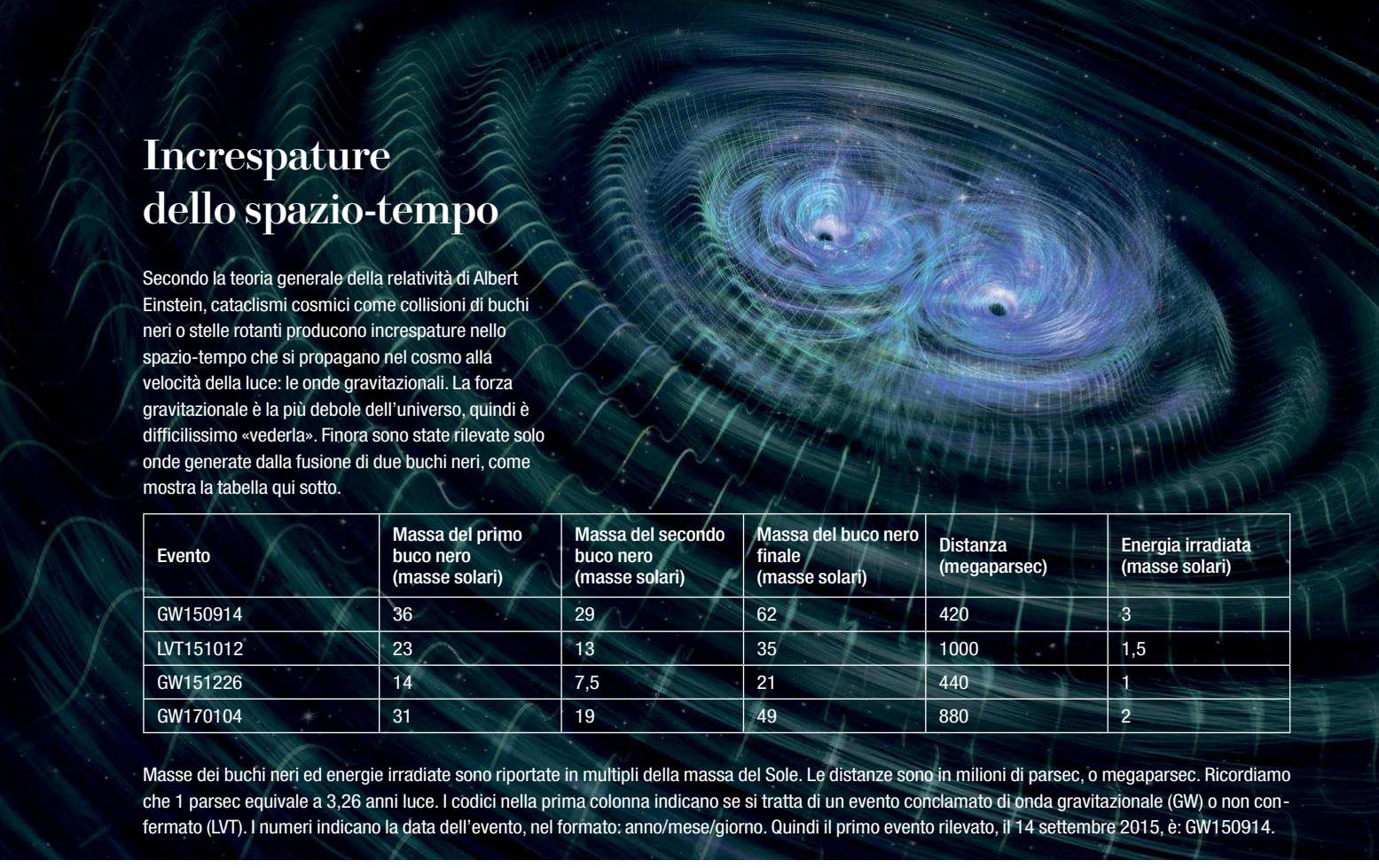
L'onda gravitazionale attraversa l'interferometro producendo una variazione molto più piccola del diametro del nucleo atomico nella lunghezza dei due bracci (uno si allunga e l'altro si accorcia).



La variazione induce uno sfasamento della luce che viene osservato dal rivelatore. Il segnale che il rivelatore misura è correlato all'ampiezza dell'onda gravitazionale.



Cortesia INFN; Centimetri.it (*illustrazione*)



Increspature dello spazio-tempo

Secondo la teoria generale della relatività di Albert Einstein, cataclismi cosmici come collisioni di buchi neri o stelle rotanti producono increspature nello spazio-tempo che si propagano nel cosmo alla velocità della luce: le onde gravitazionali. La forza gravitazionale è la più debole dell'universo, quindi è difficilissimo «vederla». Finora sono state rilevate solo onde generate dalla fusione di due buchi neri, come mostra la tabella qui sotto.

Evento	Massa del primo buco nero (masse solari)	Massa del secondo buco nero (masse solari)	Massa del buco nero finale (masse solari)	Distanza (megaparsec)	Energia irradiata (masse solari)
GW150914	36	29	62	420	3
LVT151012	23	13	35	1000	1,5
GW151226	14	7,5	21	440	1
GW170104	31	19	49	880	2

Masse dei buchi neri ed energie irradiate sono riportate in multipli della massa del Sole. Le distanze sono in milioni di parsec, o megaparsec. Ricordiamo che 1 parsec equivale a 3,26 anni luce. I codici nella prima colonna indicano se si tratta di un evento conclamato di onda gravitazionale (GW) o non confermato (LVT). I numeri indicano la data dell'evento, nel formato: anno/mese/giorno. Quindi il primo evento rilevato, il 14 settembre 2015, è: GW150914.

masse di questo ordine di grandezza. È la prova sperimentale che questi sistemi binari possono formarsi e morire in un tempo inferiore all'età dell'universo e ciò può accadere con una frequenza niente affatto trascurabile. Allo stato attuale abbiamo valutato che, esplorando un volume sferico di 1 gigaparsec cubo (1 parsec equivale a 3,26 anni luce), la frequenza media di tali eventi dovrebbe essere dell'ordine di 100 all'anno .

Prima del 14 settembre 2015 l'evidenza dell'esistenza stessa dei buchi neri era limitata a osservazioni dei raggi X emessi quando la materia risucchiata da una stella cade verso il buco nero. Nella maggioranza dei casi erano stati individuati oggetti la cui massa era compresa tra 5 e 10 masse solari. Già con la prima osservazione, due buchi neri di 29 e 36 masse solari rispettivamente, il quadro della distribuzione di massa di questi oggetti nell'universo è sconvolto. Occorrono però ulteriori osservazioni per confrontare i dati con le previsioni delle teorie di formazione di questi sistemi.

L'altro importante risultato riguarda la verifica della relatività generale nel suo aspetto finora inesplorato, ovvero la dinamica dei corpi in campi gravitazionali estremamente intensi. I test di validità della teoria di Einstein erano stati dedotti osservando sistemi in cui il campo gravitazionale era sufficientemente debole da poter trattare gli effetti relativistici come una piccola perturbazione della gravità newtoniana. Nel caso dei processi osservati, questa approssimazione non è più valida e la ricerca di una crepa nell'impianto teorico di Einstein si fa molto più interessante.

Un esempio di questo nuovo processo di verifica riguarda la previsione di Einstein secondo cui la velocità delle onde gravitazionali è pari a quella della luce. Questo implica che il gravitone, ovvero la particella mediatrice dell'interazione gravitazionale, ipotizzata ma non ancora scoperta, deve avere massa nulla, come il fotone. Da queste prime osservazioni si è già posto un limite superiore alla massa del gravitone, limite pari a $7{,}7 \times 10^{-23}$ elettronvolt/c^2 (come termine di paragone basti pensare che la massa dell'elettrone espressa nelle stesse unità è pari a 0,511 milioni di elettronvolt/c^2).

La scienza delle onde gravitazionali

Il modello standard descrive i componenti primi della materia e le loro interazioni. Esso costituisce un quadro ben verificato sperimentalmente con le scoperta delle particelle W, Z e recentemente di quella di Higgs. Dopo gli sviluppi ottocenteschi che portarono all'unificazione di elettricità e magnetismo, il modello sancisce un altro passo in avanti verso la grande unificazione delle forze: costituisce il quadro unificante dell'interazione elettromagnetica con quella debole, responsabile del decadimento radioattivo. Si tratta di una teoria di campo quantistica che include la relatività ristretta e si basa sulla richiesta che il risultato di esperimenti in cui queste interazioni sono determinanti, non deve dipendere dal luogo e dal tempo in cui si opera.

Questo è un principio di simmetria locale ed è il punto di contatto tra il modello standard e la relatività generale di Einstein che descrive le proprietà della gravitazione.

Guardando alla storia dell'elettromagnetismo, il grande passo in avanti verso una conoscenza più profonda di questa interazione dopo la prima grande unificazione tra elettricità e magnetismo, raggiunta studiando processi stazionari, è stato fatto con la rilevazione delle onde elettromagnetiche. Questo è il punto di partenza che ha portato in seguito all'elettrodinamica quantistica, cioè la teoria quantistica che descrive tutti i fenomeni di interazione elettromagnetica delle particelle elementari.

Fino alla fine del XX secolo, la gravità era sostanzialmente limitata allo studio di campi gravitazionali stazionari. Oggi possia-

Nicolle R. Fuller/Science Photo Library/AGF

mo affermare che il nuovo capitolo della gravitodinamica, ovvero lo studio dei campi gravitazionali velocemente variabili nel tempo, è stato aperto con la prima osservazione diretta di un segnale di onda gravitazionale.

Nonostante i numerosi sforzi teorici, gravità e meccanica quantistica non trovano ancora una solida base di unificazione suffragata da osservazioni sperimentali: in futuro la fisica delle onde gravitazionali potrebbe rappresentare il banco di prova cruciale di questa sfida scientifica.

Finora i segnali rilevati da LIGO corrispondono a coalescenze di buchi neri. Nel caso di un analogo processo che vedrebbe coinvolti un buco nero e una stella di neutroni, o due stelle di neutroni, il segnale gravitazionale potrebbe essere accompagnato da a emissioni di raggi gamma. Una rivelazione simultanea di onde gravitazionali e raggi gamma sarebbe uno splendido esempio di astronomia multimessaggera. Le osservazioni congiunte di segnali elettromagnetici e gravitazionali vanno coordinate in maniera efficiente con ritardi ridotti il più possibile nella trasmissione delle informazioni tra osservatori di diverso tipo.

Il sistema evolve formando un nuovo oggetto compatto in cui la materia raggiunge livelli di compressione impossibili da realizzare in laboratorio, e i segnali gravitazionali trasportano informazioni uniche sulle proprietà della materia e dell'interazione gravitazionale in condizioni così estreme. Le deformazioni che si innescano in questi processi condizionano la forma dei segnali emessi, e sono il tramite che ci permette di inferire lo stato della materia nella stella.

La fisica delle onde gravitazionali potrebbe fare luce sull'unificazione tra relatività e meccanica quantistica

Le osservazioni gravitazionali possono chiarire quale sia la distribuzione di massa di questi oggetti compatti nell'universo. Il valore massimo della massa di una nana bianca è circa 1,4 volte la massa del Sole. Al di sopra di questo valore si forma una stella di neutroni in cui la materia raggiunge densità incredibili: circa 200 milioni di tonnellate per centimetro cubo, un regime noto come cromodinamica quantistica (QCD) ad alta densità. L'interno della stella potrebbe essere un mare di quark, le particelle elementari che costituiscono i mattoni fondamentali di protoni e neutroni. Nella materia che abbiamo studiato fino a oggi, i quark sono confinati all'interno di protoni e neutroni. Nel cuore della stella di neutroni, dove si raggiungono pressioni altissime, i quark potrebbero essere legati direttamente tra loro formando un unico gigantesco esempio di particella nucleare nello stato fondamentale. A questa ipotesi se ne affiancano altre, forse meno esotiche, ma che convergono nell'indicare come questo sistema sia un laboratorio unico per lo studio della QCD, la teoria che studia l'interazione forte, cioè la forza che si esercita tra protoni e neutroni del nucleo atomico e tra alcune particelle subnucleari.

La massa massima di una stella di neutroni è un ulteriore test della natura della materia a queste densità estremamente elevate. Secondo alcuni modelli, si aggirerebbe attorno a tre volte la massa del Sole. In realtà il valore è sconosciuto, e dovrebbe essere determinato costruendo con precisione la distribuzione statistica della massa di questi oggetti nell'universo, grazie all'osservazione di un gran numero di sistemi binari di stelle di neutroni con la futura generazione di rivelatori di onde gravitazionali. La distribuzione di massa dei buchi neri è un'altra potenziale fonte di informazione per chiarire i meccanismi di formazione stellare, e potrebbe rispondere alla domanda se queste coppie di buchi neri siano primordiali o siano il risultato di processi di cattura. Inoltre potrebbe svelare gradite sorprese sul fronte della fisica fondamentale. Recenti sviluppi teorici hanno ipotizzato che attorno a un buco nero si formino nubi di sfuggenti particelle fondamentali, chiamate assioni, la cui esistenza è stata ipotizzata da molti anni e che oggi sono una delle ipotesi di riferimento per chiarire il mistero della materia oscura, che, secondo i modelli correnti, non emette radiazione elettromagnetica e si manifesta tramite effetti gravitazionali.

L'evoluzione futura

I rivelatori di seconda generazione funzioneranno ancora per dieci anni circa, alternando periodi di presa dati a periodi di ulteriore miglioramento della sensibilità. Altri aggiornamenti sono già allo studio o pronti alla realizzazione. Nel frattempo si pensa anche a rivelatori di terza generazione, in grado di migliorare la sensibilità di un altro ordine di grandezza ed esplorare un volume di universo un milione di volte più grande rispetto a Virgo e LIGO. Questo permetterebbe, per esempio, di rilevare segnali di coalescenza di buchi neri fino ai confini dell'universo, aprendo la via alla cosmologia con onde gravitazionali.

La proposta studiata più a fondo è l'Einstein Telescope, un progetto sviluppato da gruppi europei, il cui studio di fattibilità è stato finanziato dall'Unione Europea. Sono previste nuove soluzioni sperimentali, come la costruzione del rivelatore in gallerie sotterranee per ridurre il contributo del rumore sismico, l'uso di specchi più grandi e raffreddati a temperature criogeniche per ridurre il rumore termico, un uso esteso delle tecniche di ottica quantistica per la produzione di luce squeezed in cui si ha una riduzione del rumore di fase o di ampiezza, a seconda dell'intervallo di frequenza di rilevazione considerato.

Dato che permetterà l'osservazione di eventi molto più lontani o con segnali molto più elevati rispetto al rumore strumentale, la nuova generazione aprirà la porta a misurazioni di interesse cosmologico, all'osservazione di effetti gravitazionali forti, alle misure di precisione sullo stato della materia nelle stelle di neutroni.

L'orizzonte temporale per la realizzazione di interferometri di terza generazione è la fine del prossimo decennio.

Nei primi anni 2030 verrà inoltre lanciato LISA, l'interferometro spaziale realizzato dall'Agenzia spaziale europea con un importante contributo dell'Agenzia spaziale italiana e dell'INFN. Lo scorso anno è stata conclusa con un grande successo la missione LISA Pathfinder, che ha dimostrato la validità di tecnologie chiave per LISA. Siamo dunque a un punto di svolta nell'indagine per la comprensione del cosmo. I rivelatori attuali, e ancora di più quelli futuri, promettono scoperte straordinarie, come sempre succede quando si apre una nuova finestra sull'universo. ■

PER APPROFONDIRE

Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger. Abbott B.P. e altri (LIGO Scientific Collaboration e Virgo Collaboration), in «Physical Review Letters», Vol. 116, n. 6, 061102, 11 febbraio 2016.

Astrophysical Implications Of The Binary Black Hole Merger GW150914. Abbott B.P. e altri (LIGO Scientific Collaboration e Virgo Collaboration), in «The Astrophysical Journal Letters», Vol. 818, n. 2, 11 febbraio 2016.

Il sito web dell'interferometro Virgo: **http://www.virgo-gw.eu.**

Il sito dello European Gravitational Observatory: **https://www.ego-gw.it.**

La prima rilevazione di onde gravitazionali ha una lunga storia, e Kip Thorne è uno dei protagonisti principali

di Giulia Alice Fornaro

Il cacciatore di onde

Il segnale rilevato dal Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) negli Stati Uniti a settembre 2015 racchiude due scoperte: onde gravitazionali e buchi neri. E non a caso: per poter rilevare un segnale che interagisce pochissimo con la materia ci è voluta la fusione di due buchi neri che, oltre un miliardo di anni fa, ha emesso l'energia di tre masse solari sotto forma di onde gravitazionali. Kip Thorne, uno dei massimi esperti mondiali di relatività generale, è stato testimone della nascita di questi due campi d'indagine. Ce lo ha raccontato lo scorso luglio al Palazzo del Cinema del Lido di Venezia dove si svolgeva la conferenza sulla fisica delle alte energie della European Physical Society che ha premiato Thorne insieme a Rainer Weiss e Barry Barish per il loro contributo alla scoperta delle onde gravitazionali.

Qual era la situazione della ricerca sui buchi neri negli anni cinquanta e sessanta e come ne è stato coinvolto?

All'inizio degli anni sessanta ero studente alla Princeton University e volevo specializzarmi sulla curvatura dello spazio-tempo. Per questo decisi di lavorare con John Wheeler, leader nella ricerca teorica su quelle che venivano chiamate singolarità di Schwarzschild, e che poi lui stesso ribattezzò «buchi neri».

In quel periodo Wheeler era tra i pochi a sostenere l'esistenza dei buchi neri, ma gli ci vollero dieci anni per convincersi, il che avvenne in gran parte grazie al lavoro che fece con Tullio Regge sulla stabilità dei buchi neri: se li solleciti, esplodono, scompaiono oppure rimangono indisturbati? Regge fece tutti i calcoli e insieme pubblicarono un articolo completo a riguardo. Fu il lavoro più importante che lessi da studente, appena sei anni dopo.

Come iniziò il suo interesse per le onde gravitazionali e per la realizzazione di LIGO?

Nei primi anni sessanta partecipai a una *summer school* a Les Houches, in Francia, dove Joseph Weber, che all'epoca faceva i suoi primi esperimenti sulle onde gravitazionali, tenne una lezione. Mi appassionai subito, anche grazie alle lunghe chiacchierate con Weber durante le escursioni sulle Alpi. Diversi anni dopo, quando arrivai al California Institute of Technology (Caltech) come giovane professore, misi insieme un gruppo di ricerca teori-

KIP THORNE, laureato al California Institute of Technology, dove è stato professore di fisica teorica fino al 2009, ha conseguito il dottorato alla Princeton University con John Wheeler e ha lavorato con Stephen Hawking e Carl Sagan. Insieme a Rainer Weiss e Ronald Drever ha fondato il Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO), che nel 2015 ha rilevato il primo segnale di onde gravitazionali. Autore di circa 200 pubblicazioni, è conosciuto soprattutto per le sue teorie sulla possibilità di viaggi nel tempo tramite cunicoli spazio-temporali. È stato consulente scientifico e produttore esecutivo per il film di Christopher Nolan *Interstellar* (2014). Tra i premi che ha ricevuto vi sono il Julius Edgar Lilienfeld Prize dell'American Physical Society, la Medaglia Albert Einstein e la UNESCO Niels Bohr Gold Medal.

Gli allievi e il maestro. Kip Thorne (al centro della foto, seduto sul divano, in jeans e camicia blu) discute con i suoi colleghi di modelli di fisica teorica.

Cortesia Mark Scheel

co che si focalizzava su buchi neri, stelle di neutroni e onde gravitazionali. Intanto a Princeton avevo incontrato Rainer Weiss, che allora era un post-doc nel gruppo sperimentale di Robert H. Dicke ed ebbi molte discussioni con lui e con i suoi colleghi perché lavoravo su parametri centrali per gli esperimenti.

Nel 1972 Weiss descrisse i tipi di rivelatori che usiamo ora con LIGO includendo una stima di tutte le principali fonti di rumore che avrebbero interessato le misure. L'articolo concludeva che rivelatori abbastanza grandi avrebbero potuto misurare le onde gravitazionali previste da me e da altri teorici. Inizialmente ero scettico, ma confrontandomi con lui mi convinsi delle possibilità di successo. Così invitammo al Caltech Ronald Drever, dalla Scozia, per guidare un gruppo che collaborasse con Weiss e il Massachusetts Institute of Technology per iniziare a costruire LIGO. Era il 1966, e avevo deciso che avrei fatto tutto il possibile per contribuire al successo di questa impresa. E così feci.

E nel 2015 è arrivato finalmente il risultato atteso. Come ha reagito alla notizia della rilevazione?

A quel tempo non seguivo più le attività di LIGO su base quotidiana. Ero ancora solo parzialmente coinvolto nelle simulazioni di due buchi neri in collisione. Quella mattina mi sono alzato e ho letto una mail di un giovane collega, Christian Hartl, che mi scriveva: «Guarda questo sito, forse abbiamo un segnale!». Era una pagina generata automaticamente da un computer e non ancora elaborata dai fisici. Ho visto un segnale così forte e perfetto che ho faticato a credere che fosse naturale. Sospettavo che fosse stato generato per testare il sistema. In quel caso si applica una forza elettrostatica per muovere gli specchi avanti e indietro nelle due sedi di LIGO, simulando l'azione delle onde gravitazionali.

Hartl mi ha risposto che non era possibile, perché la ricerca ufficiale non era ancora cominciata. Allora ho iniziato a credere che potesse essere vero. Ma, a differenza dei giovani, la mia prima reazione emotiva non è stata di eccitazione. Piuttosto di sollievo, per aver finalmente ottenuto un risultato che giustificava tanti sforzi economici di fronte all'opinione pubblica. E poi di profonda soddisfazione per aver indirizzato tutte le mie energie, insieme agli sperimentali, in un percorso ottimale che ha permesso il successo. Un risultato ottenuto proprio come mi aspettavo dal 1980.

Quali sono le prospettive della ricerca sulle onde gravitazionali dal suo punto di vista, il suo sogno come teorico?

Probabilmente nei prossimi trent'anni sarà possibile esplorare la nascita dell'universo. Non tanto con LIGO o Virgo, ma con rivelatori di onde gravitazionali in altre bande di frequenza. Mi aspetto che entro i prossimi 15-20 anni ne avremo quattro diverse, analogamente a quello che è successo nella spettroscopia astronomica, che in pochi decenni ha indagato banda visibile, radiofrequenze, infrarossi e raggi X. Sarà tutto molto rapido, fantastico!

Potremo osservare i primissimi momenti del cosmo e la nascita delle quattro forze fondamentali. Si stima per esempio che la forza elettromagnetica sia nata nel primo miliardesimo di secondo dell'universo. Vedremo tutto con un discreto grado di sicurezza grazie alle onde gravitazionali generate come prodotto collaterale alla nascita di queste forze. E potremo studiare altro, come collisioni di buchi neri, buchi neri che distruggono stelle e così via.

Lei ha contribuito anche alla divulgazione scientifica in particolare collaborando con Chris Nolan per realizzare il film *Interstellar*. Quanto è importante essere attivi come divulgatori?

Innanzitutto è un dovere morale degli scienziati rendere conto di quello che si fa con i fondi pubblici. Ma anche noi ricercatori abbiamo un ritorno diretto nel fare divulgazione. Nella mia esperienza con il film è stato formativo cercare di visualizzare quello che noi teorici maneggiamo sotto forma di equazioni e simulazioni. La visualizzazione, come quella realizzata per mostrare Gargantua, ci aiuta a comprendere meglio quello che studiamo e i risultati che otteniamo. ■

CHIMICA

Sorgenti di vita

Pensavamo che le profondità degli oceani ospitassero le prime forme di vita. Nuovi elementi indicano invece un paesaggio vulcanico attivo

di Martin J. Van Kranendonk, David W. Deamer e Tara Djokic

Luogo di nascita. La vita sulla Terra potrebbe essere iniziata in luoghi simili alla Grand Prismatic Spring del Parco nazionale di Yellowstone.

Martin J. Van Kranendonk è direttore dell'Australian Center for Astrobiology presso la School of Biological, Earth and Environmental Sciences dell'Università del Nuovo Galles del Sud. Da oltre trent'anni effettua ricerche su rocce estremamente antiche sparse per il pianeta.

David Deamer è professore al Dipartimento di ingegneria biomolecolare dell'Università della California a Santa Cruz. Ha all'attivo, come autore o curatore, 12 libri tra cui *First Life* (2011), pubblicato da University of California Press.

Tara Djokic è dottoranda all'Australian Centre for Astrobiology presso l'Università del Nuovo Galles del Sud. Il suo progetto combina osservazioni geologiche sulle prime tracce di vita nell'Australia occidentale con tecnologie di realtà virtuale.

buio pesto. Ci stiamo facendo strada attraverso una fitta boscaglia nell'Australia nord-occidentale, guidati solo dalla luce fioca dello schermo di un navigatore GPS. È una luce troppo debole per mostrare gli alberi caduti che riempiono il letto del torrente secco che stiamo seguendo, e continuiamo a inciampare. Siamo due geologi al lavoro in una regione remota dell'Australia chiamata Pilbara: Djokic in testa e Van Kranendonk molti passi dietro. Il nostro fuoristrada, parcheggiato da qualche parte su un piccolo altopiano, ci sembra dall'altra parte del mondo. Non sappiamo con certezza se le pile del navigatore reggeranno abbastanza a lungo da mostrarci la via del ritorno.

Il cielo notturno, un'esplosione di innumerevoli stelle visibili fino all'orizzonte, brilla in uno spettacolo meraviglioso mentre Giove danza con il vicino pianeta Venere. Purtroppo questo spettacolo aiuta poco la navigazione di due scienziati come noi, che arrancano per l'entroterra australiano a giugno 2014.

Mentre risale lungo l'argine del torrente, all'improvviso Djokic inciampa tornando in basso. Ha forse perso l'equilibrio? Per aiutarla a non cadere Van Kranendonk si allunga per fermarla e la spinge in su, il che scatena un urlo, un verso incomprensibile e infine un balbettio: «Ra... Ra... Ra... Ragno!». Djokic non è inciampata. È in modalità di fuga, in preda al terrore mentre cerca di levarsi di dosso la spessa ragnatela che la avvolge. I ragni hanno una reputazione meritatamente pessima in Australia. Quando si è al buio, non è una buona idea ipotizzare di avere trovato una delle insolite specie benigne.

Il motivo per cui vaghiamo per Pilbara di notte è che abbiamo passato la giornata stregati da una nuova scoperta che Djokic ha fatto in un blocco di rocce sedimentarie datate a 3,48 miliardi di anni fa, chiamato Formazione di Dresser. Alcune delle rocce sono strati spiegazzati di colore bianco e arancione, chiamati geyseriti, creati da un geyser vulcanico sulla superficie terrestre. Le geyseriti mostrano bolle formatesi quando il gas è rimasto intrappolato in una pellicola vischiosa, probabilmente prodotta da un sottile strato di microrganismi simili a batteri. Le rocce superficiali e le tracce di questo biofilm sostengono una nuova idea su uno dei più antichi misteri del nostro pianeta: come e dove abbia avuto inizio la vita. Le prove suggeriscono sorgenti calde e pozze vulcaniche, sulla terraferma, circa 3,5 miliardi di anni fa.

È un'immagine delle origini della vita molto diversa da quella che gli scienziati hanno tracciato dal 1977. In quell'anno, sul fon-

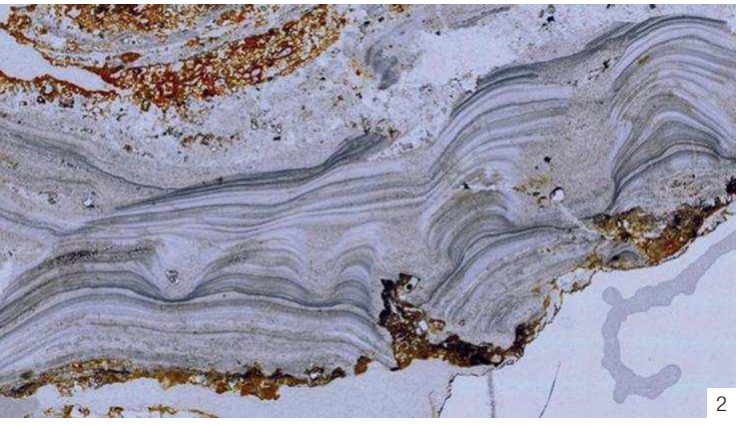
IN BREVE

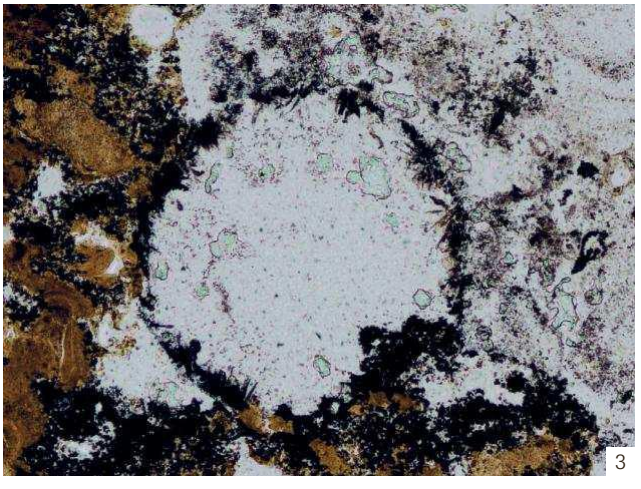
Per iniziare, la vita sulla Terra ha avuto bisogno di energia per creare molecole complesse e di modi per mettere insieme queste molecole.

Alcuni sistemi di pozze vulcaniche e di sorgenti termali sulla terraferma hanno gli ingredienti necessari per la vita, l'alternanza di fasi secche e umide necessaria per l'interazione e la selezione naturale.

Una teoria delle origini della vita basata sul vulcanismo di terraferma, rispetto a quella basata sugli oceani, può spingerci a cercare la vita extraterrestre in luoghi diversi del sistema solare.

Werner Van Steen/Getty Images (*pagine precedenti*)





Vita sulle rocce. Le rocce arancioni della regione australiana Pilbara, chiamate geyseriti, sono composte da minerali spruzzati dai geyser all'interno di sorgenti termali (*1*). Al microscopio (lato di un centimetro) le rocce mostrano caratteristiche fasce scure, ricche di titanio, e fasce chiare, composte in gran parte di potassio (*2*). Le minuscole bollicine conservate in questa geyserite di 3,5 miliardi di anni fa si sono formate in biofilm vischiosi, prodotti da organismi viventi (*3*).

Cortesia Martin J. Van Kranendonk

do dell'Oceano Pacifico il sommergibile per la ricerca scientifica *Alvin* aveva scoperto bocche idrotermali da cui uscivano minerali come ferro e zolfo e gas come metano e acido solfidrico, circondate da batteri primitivi e grandi vermi. Era un ecosistema fiorente. Da allora, i biologi hanno teorizzato che camini simili, protetti dai cataclismi che devastarono la superficie terrestre quattro miliardi di anni fa, abbiano fornito energia, sostanze nutritive e un rifugio sicuro per l'inizio della vita. Ma la teoria ha qualche problema. Il più grande è che nell'oceano c'è molta acqua, e le molecole necessarie vi si sarebbero diffuse troppo rapidamente per interagire e formare membrane cellulari e metabolismi primitivi.

Oggi, noi e altri scienziati siamo convinti che pozze sulla terraferma, che si seccavano di continuo e poi tornavano di nuovo acquose, fossero luoghi molto più adatti. Le pozze hanno il calore per catalizzare reazioni, periodi di secca in cui alcune molecole complesse chiamate polimeri possono formarsi a partire da unità più semplici, periodi con acqua durante i quali questi polimeri possono galleggiare e nuovi periodi di secca che li isolano in piccole cavità dove possono interagire e addirittura concentrarsi in compartimenti di acidi grassi: i prototipi delle membrane cellulari.

La scoperta di Djokic è una forte indicazione geologica del fatto che la Formazione di Dresser, oggi un ambiente arido, caldo e sterile, un tempo era come le pozze fumanti e i geyser attivi del Parco nazionale di Yellowstone, negli Stati Uniti: un sito geotermale attivo. E ovunque nella formazione ci sono tracce fossili di vita strettamente associate con l'antico sistema di sorgenti termali. Sebbene la Formazione di Dresser non sia il luogo in cui davvero le più antiche forme di vita hanno avuto origine mezzo miliardo di anni prima, ci ha fornito le prove che gli ambienti idrotermali di terraferma erano presenti già nelle primissime fasi della storia della Terra. Nel 1871 Charles Darwin aveva suggerito che la vita microbica ebbe inizio in «qualche pozza tiepida». Oggi molti scienziati di campi diversi pensano che l'autore di *L'origine delle specie* avesse colto d'istinto qualcosa di importante. E le implicazioni di idee come queste si spingono oltre i confini del nostro pianeta: nella ricerca di forme di vita aliene in altre parti del sistema solare, una teoria basata sulla terraferma ci porterebbe in luoghi e pianeti diversi rispetto a una basata sugli oceani.

Dalla Russia con la vita

Dieci anni prima dello scontro tra Djokic e la ragnatela, un altro di noi (Deamer) aveva dimostrato che le pozze vulcaniche avrebbero potuto favorire l'assemblaggio di compartimenti fatti di membrane, barriere essenziali di tutte le forme di vita cellulari. Deamer aveva guidato una spedizione di scienziati nell'Estremo Oriente russo, presso Mutnovsky, un vulcano attivo nella Penisola della Kamčatka. Il gruppo aveva esplorato un sito simile a un ambiente prebiotico, il tipo di regione che dà ai ricercatori un'idea di quello che il pianeta doveva essere 4 miliardi di anni fa, prima che cominciasse la vita. L'idea di Deamer era che i componenti molecolari di base più semplici potrebbero unirsi a formare polimeri più lunghi e ricchi di informazione, come gli acidi nucleici, necessari per la crescita e la replicazione della vita primitiva, una volta esposti all'alternanza di fasi umide e fasi secche che caratterizzavano le sorgenti termali della terraferma. Nelle stesse condizioni potrebbero formarsi altri polimeri chiave, i peptidi, a partire da amminoacidi. Cosa fondamentale, altri ingredienti ancora, i lipidi, potrebbero assemblarsi in compartimenti microscopici per ospitare e proteggere i polimeri portatori di informazioni. Perché la vita avesse inizio erano necessari tutti questi composti, e a Mutnovsky c'era una moltitudine di sorgenti termali e geyser dove mettere alla prova l'idea.

Deamer si era portato dietro una bottiglia di polvere bianca

contenente materie prime presumibilmente disponibili sulla Terra prebiotica, tra cui quattro amminoacidi e quattro basi chimiche che compongono acidi nucleici presenti in natura, più fosfato, glicerolo e un lipide. Aveva versato questa miscela nel mezzo di una piccola sorgente ribollente. Nel giro di pochi minuti attorno ai bordi della sorgente era emersa una soffice schiuma bianca. Era composta da innumerevoli vescicole microscopiche, ciascuna contenente composti che erano presenti nel brodo originale.

Se i compartimenti si seccavano attorno ai bordi della pozzanghera, era possibile che le particelle che contenevano, già molto vicine tra loro, si unissero a formare polimeri? E questo potrebbe essere un primo passo verso l'origine della vita? In laboratorio Deamer e colleghi avevano testato questa idea mescolando semplici acidi nucleici, chiamati nucleotidi, con lipidi. La miscela era stata sottoposta a cicli di ammollo ed essiccazione sotto le condizioni acide e le alte temperature che si trovano nella pozza in Kamčatka. Risultato: polimeri più lunghi che andavano da 10 a oltre 100 nucleotidi di lunghezza. Studi successivi con diffrazione a raggi X hanno dimostrato che i polimeri somigliavano ad acidi ribonucleici, o RNA. Inoltre questi polimeri erano inglobati dai lipidi a formare un gran numero di compartimenti microscopici chiamati protocellule. Anche se non erano viventi, erano chiaramente un passo importante verso la vita.

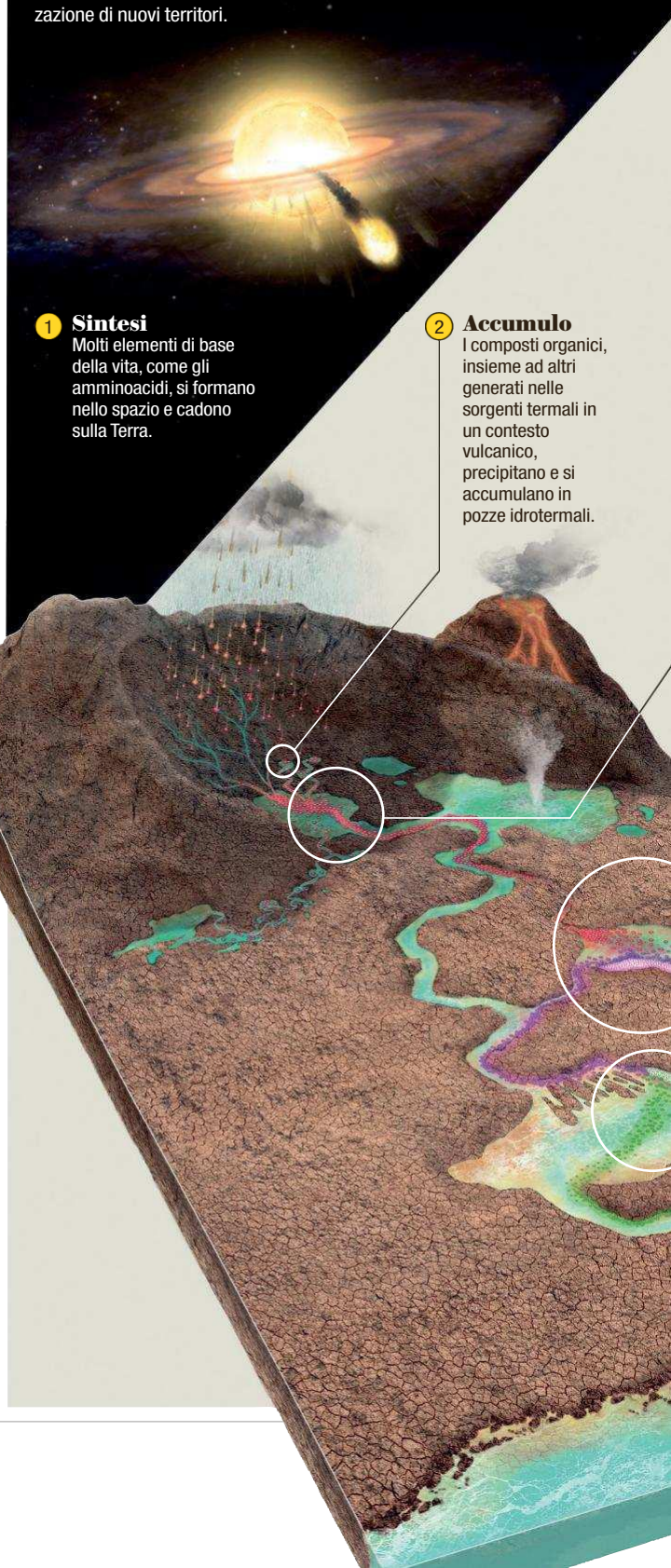
Negli esperimenti, Deamer aveva usato solo pochi cicli secco-acquoso e aveva ottenuto molecole relativamente semplici. Un suo collega all'Università della California a Santa Cruz, l'informatico Bruce Damer, aveva ipotizzato che molti più cicli avrebbero aggiunto un'altra caratteristica chiave: la sopravvivenza del più adatto. Ogni ciclo di essiccazione, pensava Damer, causa l'apertura delle membrane lipidiche delle vescicole, permettendo a polimeri e sostanze nutritive di mescolarsi. Una volta reidratate, le membrane lipidiche reingloberanno miscele diverse di polimeri, ognuna effetto di una specie di esperimento naturale. Le protocellule più complesse avranno migliori possibilità di sopravvivenza perché la maggiore varietà di miscele molecolari potrà stabilizzare le protocellule sotto condizioni diverse: un insieme di molecole utile in una certa serie di ambienti, un altro in una serie differente. Queste protocellule intatte, quindi, sopravviveranno e trasmetteranno queste combinazioni di polimeri alla generazione successiva, salendo una scala crescente di complessità. Damer aveva capito che questo modello era l'equivalente di un computer chimico che «avviava» le funzioni della vita, partendo da «programmi» casuali scritti in forma di polimeri.

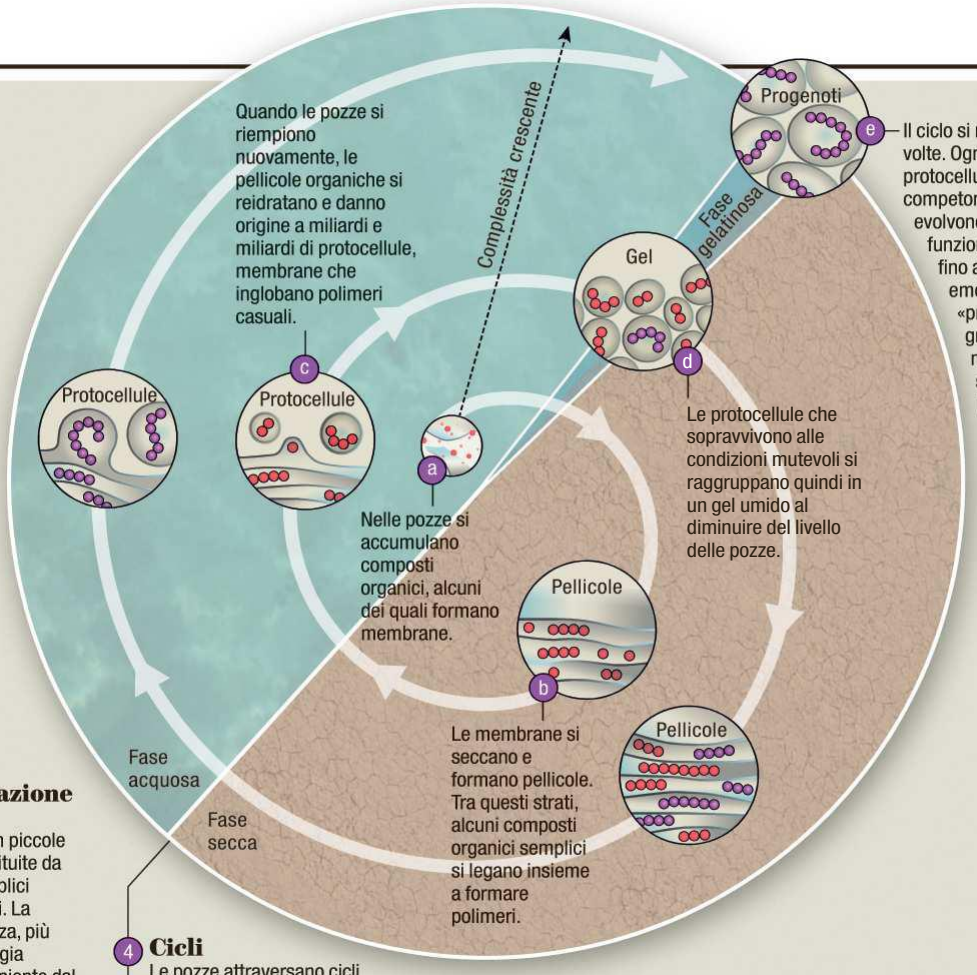
Nel 2015 Damer ha aggiunto un terzo passaggio al ciclo a due fasi: uno stadio intermedio tra acquoso e asciutto. L'idea era nata durante una spedizione con i coautori alla Formazione di Dresser in cerca di stromatoliti, cioè gli strati fossilizzati di film batterici e alcune delle prime prove della vita sulla Terra. Damer attraversava il deserto vicino a un affioramento di granito noto come Gallery Hill, ricoperto da incisioni rupestri aborigene dette petroglifi. Sulla strada aveva notato film microbici essiccati, di colore marrone, in piccole depressioni negli affioramenti. Spinto dalla curiosità aveva versato acqua sui biofilm, i quali erano poi tornati in vita, diventando verdi e gelatinosi.

Damer aveva capito che se nei cicli fase secca-fase acquosa di una pozza primordiale fosse stata presente anche una fase umida, in cui le protocellule sopravviventi potevano raggrupparsi in un gel simile, polimeri e sostanze nutritive avrebbe avuto modo di mescolarsi e diffondersi attraverso le barriere delle membrane lipidiche. Questa società cooperativa di protocellule avrebbe avuto an-

Il paesaggio della genesi

Secondo una teoria, ambienti termali come sorgenti, pozze e geyser possono avviare i sistemi chimici necessari affinché la vita sulla Terra abbia inizio. Le condizioni hanno dato il via a sette fasi, dalla sintesi chimica a vari cicli di complessità crescente, per terminare con la colonizzazione di nuovi territori.





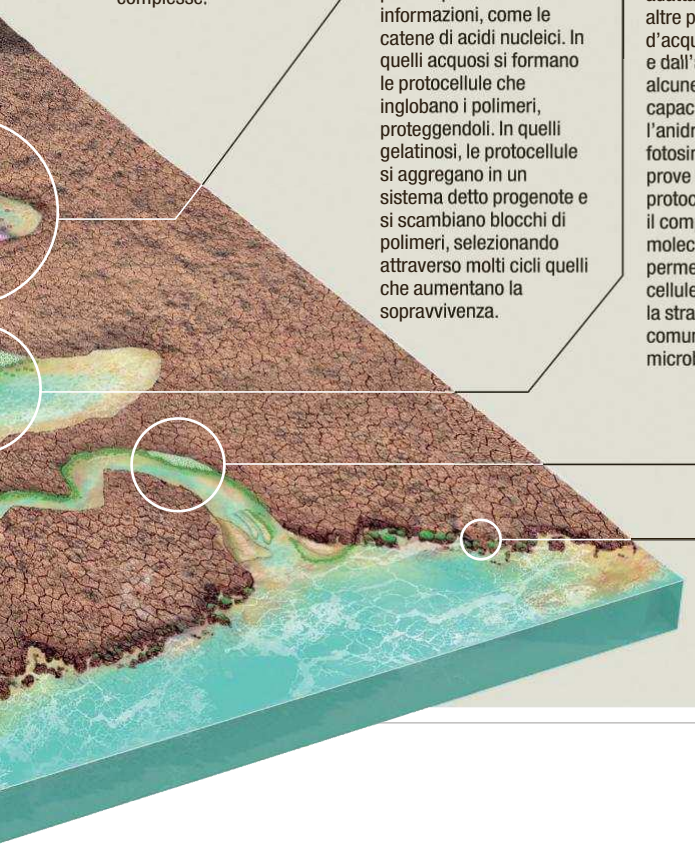
3 **Concentrazione**
I composti si concentrano in piccole vescicole costituite da molecole semplici chiamate lipidi. La stretta vicinanza, più calore ed energia chimica proveniente dal sistema di sorgenti, li porta a legarsi insieme per formare catene molecolari più complesse.

4 **Cicli**
Le pozze attraversano cicli ripetuti di tre fasi: secca, acquosa e gel umido. I periodi secchi facilitano la sintesi dei polimeri usati per trasportare informazioni, come le catene di acidi nucleici. In quelli acquosi si formano le protocellule che inglobano i polimeri, proteggendoli. In quelli gelatinosi, le protocellule si aggregano in un sistema detto progenote e si scambiano blocchi di polimeri, selezionando attraverso molti cicli quelli che aumentano la sopravvivenza.

5 **Diffusione**
Le protocellule meglio adattate si diffondono in altre pozze o corsi d'acqua, spinte dal vento e dall'acqua stessa, alcune sviluppano la capacità di usare l'anidride carbonica per la fotosintesi. Dopo molte prove ed errori, una protocellula mette insieme il complesso apparato molecolare che le permette di dividersi in cellule figlie. Questo apre la strada alla prima comunità vivente microbica.

6 **Adattamento**
Alcuni di questi primi microrganismi finiscono fuori dalle loro originarie pozze di acqua dolce arrivando nell'acqua salata degli estuari; quelli che sopravvivono trasmettono caratteri che aiutano i loro discendenti a estendere la loro distribuzione agli oceani.

7 **Colonizzazione**
Le tempeste marine e la trazione delle maree selezionano robusti biofilm di microbi in grado di cementarsi l'uno all'altro usando granelli di minerali. Questi strati si accumulano in pile chiamate stromatoliti, come quelli che si trovano in Australia occidentale. La vita continua a espandersi in altre nicchie, ponendo le basi per le cellule a vita libera. Dopo miliardi di anni, questi organismi si evolvono in piante e animali multicellulari complessi.



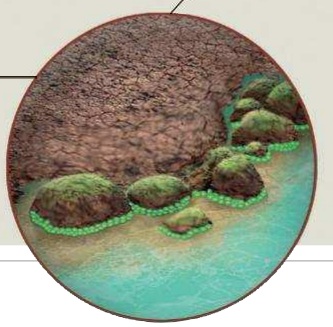


Illustrazione di Jose Miguel Mayo (*ambiente*) e Jen Christiansen (*dettaglio del ciclo*)

Una terra attraverso il tempo

La prima volta che ho messo piede nella regione Pilbara dell'Australia occidentale, un ambiente con informazioni sull'inizio della vita vecchie di 3,5 miliardi di anni, sono rimasto molto deluso. Era il 1994. Arrivavo entusiasta dalla cittadina di Port Hedland, sulla costa occidentale, ma tutto quello che ho visto nei primi 150 chilometri sono stati alberi rinsecchiti e contorti, cumuli di polvere fumanti che attraversavano una pianura bruciata e uniforme. Mi sentivo desolato. In che guaio mi ero cacciato? E il caldo, poi! Non avevo mai sperimentato niente di tanto brutale prima di allora. Né mai respirato un'aria così infestata da mosche e zanzare.

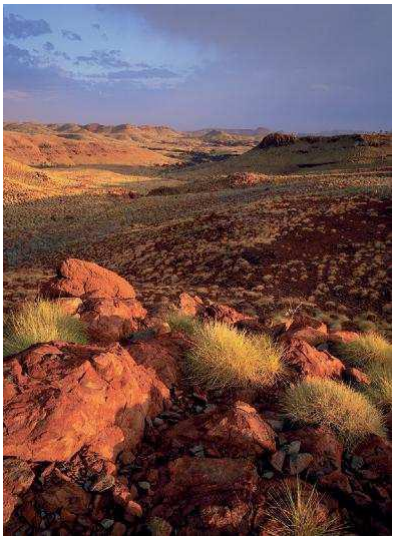
Ma via via che continuavamo verso sud sull'autostrada per Marble Bar, la città più calda dell'Australia, all'orizzonte iniziavano a spuntare le prime basse, ampie colline. Abbiamo attraversato fiumi e torrenti sabbiosi, come il poderoso Shaw, i cui argini erano ornati da lussureggianti alberi di *coolabah* dai caratteristici tronchi bianco smagliante.

Abbiamo proseguito lungo uno sterrato tra i colli, poi le pianure riarse hanno lasciato il posto a colline coperte d'erba. La chiamano *spinifex*: è una pianta meravigliosa, ma diabolica. Cresce formando cespugli che raggiungono il metro di diametro, con steli arrotondati e sottili che si assottigliano come punte d'ago fatte di silice quasi pura. Queste punte penetrano qualsiasi tessuto. Il mio supervisore aveva tirato fuori due ghette robuste per proteggersi le gambe. Ma non aveva pensato di informarmi del pericolo. Senza ghette, nel giro di pochi minuti ero diventato un porcospino ambulante, la pelle trafitta da migliaia di aghi silicei destinati a rompersi e restare per mesi nella mia carne.

Il sito, però, valeva tutto questo disagio. Ho camminato su alcune delle rocce più antiche e meglio conservate della Terra, che contenevano testimonianze di vita risalenti quasi alle origini del nostro pianeta. Osservando le strutture rugose al di sopra delle increspature degli antichi sedimenti ho capito che quello che vedevo erano i resti dei nostri bis-bis-bis-nonni, i precursori di tutta la vita complessa sulla Terra!

L'area era molto diversa rispetto a quando si era formata, 3,5 miliardi di anni fa. A quel tempo era una terra vulcanica nera, priva di ogni colore di vegetazione. Oltre le colline forse avrei visto un mare verde e ricco di ferro sotto un cielo arancione carico di anidride carbonica e privo di ossigeno. Nel paesaggio circostante avrei incontrato campi di sorgenti termali, dove avrei cominciato a scorgere un po' di colore. Avrei visto sprazzi di bianco, giallo, rosso attorno alle pozze ribollenti di fango e ai getti dei geyser: i colori di zolfo, argilla e ferro. E in alcune pozze e canali ci dovevano essere toni di *beige*, rosso e viola: colonie di microbi amanti del caldo e delle sostanze chimiche del luogo. Forse c'era addirittura qualche tocco di verde, opera dei primi organismi fotosintetici.

La culla della vita? La regione australiana Pilbara, oggi arida, una volta era sede di sorgenti termali e geyser.



Se potessi viaggiare con una macchina del tempo fino a un miliardo di anni dopo, vedrei Pilbara sepolta sotto chilometri di lava e sedimenti vulcanici; vedrei i continenti muoversi sulla superficie del globo e schiantarsi contro altri pezzi di crosta, e queste collisioni generare catene montuose. Arrivato a 2,5 miliardi di anni fa, vedrei gli oceani riempirsi di vita, le zone costiere poco profonde occupate da enormi barriere di microbi primitivi, i cianobatteri, che si impilano in strati di biofilm chiamati stromatoliti. Il cielo si colorerebbe di azzurro per l'attività di batteri fotosintetici che assorbono il carbonio ed emettono ossigeno in atmosfera. Un altro paio di miliardi di anni e il mondo si raffredderebbe, per poi essere ricoperto globalmente da uno strato di ghiaccio, eliminando quasi ogni forma vivente. Al suo scioglimento, i livelli di ossigeno aumentano di nuovo. La vita riprende a pieno regime. Gli animali colonizzano la terraferma, e come loro anche i nuovi tipi di piante. La Terra inizia a farsi davvero verde e compare un'ampia varietà di organismi, tra cui, purtroppo per me, la spinifex. *M.J.V.K.*

cora più possibilità di trovare le molecole più adatte alla sopravvivenza. Quarant'anni prima, in effetti, gli scienziati George Fox e il defunto Carl Woese avevano proposto il termine «progenote» per una simile fase primordiale della vita; Fox ha poi confermato a Damer che il progenote coincide con il suo gel protocellulare.

Bacini di innovazione

Le bolle e la composizione minerale trovate da Djokic nella Formazione di Dresser la rendevano un luogo probabile per il ciclo in tre parti, e ne abbiamo pubblicato le prove su «Nature Communications». Dopo aver capito che un tempo la formazione era piena di sorgenti calde superficiali in un sistema geotermale, ci è stato chiaro che conteneva anche molti degli ingredienti chiave e strutture organizzative richiesti per l'origine della vita. C'era una fonte di energia sotto forma di fluidi idrotermali circolanti, ricchi di idrogeno, riscaldati dal basso dal magma. Le rocce contenevano abbondanti quantità di boro, un ingrediente fondamentale nella sintesi del ribosio necessario per gli acidi nucleici come l'RNA.

Nella Formazione di Dresser ci sono anche minerali fosfatici che si dissolvono dalle rocce sottostanti e si uniscono ai fluidi geotermali acidi in circolo. Il fosfato è una componente importante degli acidi nucleici, ma è anche usato da tutte le forme viventi sotto forma di ATP (adenosin trifosfato, la molecola che fornisce energia nelle cellule). C'erano poi alte concentrazioni di zinco e manganese, componenti di molti enzimi nel citoplasma delle cellule di tutti i gruppi viventi noti, ed elementi presenti nelle bocche idrotermali e nei depositi vulcanici evaporativi del lago. Infine, la formazione aveva anche argille, che possono agire da catalizzatori nella sintesi di molecole organiche complesse grazie agli strati elettricamente carichi dei minerali in superficie.

Forse la cosa più entusiasmante della Formazione di Dresser come analogo di ambiente delle origini è la sua straordinaria varietà, perché in questo campo della scienza la varietà è tutto. Oggi la formazione è arida e rocciosa, ma nella loro giovinezza questi ambienti di sorgente termale contengono centinaia di pozze, ciascuna leggermente diversa per pH, temperatura, ioni disciol-

Theo Allofs/Getty Images

ti e altre caratteristiche chimiche. Sono siti ad alta complessità chimica perché presentano tre interfacce altamente reattive: tra acqua e roccia, tra acqua e aria, tra roccia e aria. I siti, inoltre, hanno temperatura diversa in punti diversi. Tutto questo va poi moltiplicato per i cicli secco-acquoso che avvengono più volte al giorno (basti pensare a Yellowstone e al suo Old Faithful), per le diverse composizioni chimiche da pozza a pozza, per le interfacce altamente reattive, per la capacità delle pozze di scambiare composti quando i geyser spruzzano il loro contenuto da ogni parte, per la rete di fratture sotterranee interconnesse e piene di fluidi. A conti fatti, sembra che un sito geotermale terrestre di 100 sorgenti possa generare un milione o più combinazioni nuove di condizioni ogni anno!

L'origine della vita è come un puzzle, non ne sappiamo ancora abbastanza per mettere ogni pezzo al posto giusto

Ogni pozza tiepida diventa un «bacino di innovazione», un banco di prova in cui qualche combinazione adattativa di molecole emerge rapidamente e ha modo di crescere e riprodursi, mentre quelle non adattative, incapaci di tenere il passo, si interrompono a metà strada. Probabilmente potrebbe essere servito un numero immenso di combinazioni per assemblare una forma primitiva di vita, nel qual caso il processo richiederebbe centinaia di milioni di anni. Ma il numero di combinazioni in questi siti geotermali di terraferma suggerisce che la vita possa avere avuto origine e cominciato a evolversi in appena 10 milioni di anni, a partire dalla comparsa di una crosta stabile punteggiata da aree vulcaniche tra gli oceani, poco più di 4 miliardi di anni fa.

Le bocche del disaccordo

Non tutti pensano che le sorgenti termali superficiali siano i luoghi più probabili per l'origine della vita. L'ipotesi delle bocche idrotermali oceaniche è ancora viva e vegeta. Al Jet Propulsion Laboratory della NASA il biochimico Mike Russell ha sviluppato, a partire dalle scoperte di *Alvin* sui camini idrotermali, un modello alternativo non ancora dimostrato. Nel suo schema, membrane minerali che formano minuscoli pori nelle rocce dei camini separano inizialmente acqua alcalina da acqua oceanica, più acida. Questo genera un gradiente di molte unità di pH, pari alla differenza tra una soluzione di ammoniaca per uso domestico e una spremuta d'arancia. Questo gradiente è una forma di energia che può essere sfruttata: proprio quello che fanno le cellule batteriche di oggi per produrre l'ATP di cui hanno bisogno. Nelle bocche c'è anche un'altra fonte di energia: la miscela di gas disciolti, tra cui idrogeno e anidride carbonica. Russell e colleghi hanno proposto che quando l'anidride carbonica contenuta nell'acqua di mare si mescolava con l'idrogeno proveniente dalle bocche il trasferimento di elettroni dall'idrogeno all'anidride carbonica avrebbe potuto sintetizzare composti organici più complessi. Secondo gli scienziati, i compartimenti minerali somigliano alle cellule, e l'energia fornita da gradienti di pH e idrogeno si sarebbe infine evoluta nel metabolismo primitivo necessario alle prime forme di vita.

L'ipotesi delle sorgenti calde e quella dei camini idrotermali hanno implicazioni importanti. Oltre a indicare la strada per nuove esplorazioni sull'origine della vita sulla Terra, suggeriscono approcci diversi su come cercare la vita su altri pianeti e loro lune. Se il modello corretto è quello delle bocche idrotermali, gli oceani ghiacciati di Encelado ed Europa sono buoni posti dove cercare. Se invece quello corretto è il nostro modello di sorgenti termali con fluttuazioni, è improbabile che quei mondi ospitino la vita.

E Marte? Anche se ci sono prove convincenti di mari poco profondi in un suo lontano passato, ci sono pochi segni di un oceano globale o di zone di espansione tettonica come quelle che generano camini idrotermali sulla Terra. Se l'inizio della vita dipende dai camini, è improbabile che sia iniziata sul Pianeta Rosso. Ma se la vita sul nostro pianeta ha avuto origine in sorgenti termali di terraferma può averlo fatto anche su Marte, che aveva tutti gli ingredienti necessari, tra cui vulcanismo diffuso e acqua. Nel 2008 il rover Spirit ha scoperto nelle Columbia Hills di Marte depositi di sorgenti idrotermali di 3,65 miliardi di anni fa, circa l'età delle sorgenti della Formazione di Dresser, che ha conservato le prime prove di vita sulla Terra.

Sia per il modello delle bocche sottomarine sia per quello delle sorgenti di terraferma c'è ancora molta strada da fare prima che uno dei due possa essere considerato corretto. L'origine della vita è come un puzzle di tanti pezzi, non ne sappiamo ancora abbastanza per mettere ogni frammento al posto giusto. Nella Formazione di Dresser, per esempio, non capiamo che cosa porti certi elementi a concentrarsi in pozze diverse, né in che modo i siti geotermali si evolvano nel tempo, né come le diverse combinazioni chimiche interagiscano per sintetizzare o degradare le molecole organiche. Dobbiamo progettare esperimenti sempre più sofisticati di chimica prebiotica in una serie di piccole pozze calde, studiando come si formano le molecole organiche complesse e come interagiscono e si combinano quando sono all'interno di membrane.

A terra come in mare le leggi chimiche e fisiche hanno fornito un quadro utile per questo specifico puzzle, e le scoperte geologiche e chimiche che abbiamo descritto ricadono in discipline diverse. Ma prima di poter avere una visione chiara dell'origine della vita dobbiamo mettere al posto giusto molti altri pezzi. Quello che ci entusiasma, però, è che vediamo la strada verso la soluzione. ■

PER APPROFONDIRE

A Nonhyperthermophilic Common Ancestor to Extant Life Forms. Galtier N. e altri, in «Science», Vol. 283, pp. 220-221, gennaio 1999.

The Onset and Early Evolution of Life. Russell M.J. e Hall A.J., in «Geological Society of America Memoirs», Vol. 198, pp. 1-32, 2006.

Geological Setting of Earth's Oldest Fossils in the ca. 3.5 Ga Dresser Formation, Pilbara Craton, Western Australia. Van Kranendonk M.J. e altri, in «Precambrian Research», Vol. 167, nn. 1-2, pp. 93-124, novembre 2008.

First Life: Discovering the Connections between Stars, Cells, and How Life Began. Deamer D., University of California Press, Oakland, 2011.

Molecular and Cellular Fossils of a Mat-like Microbial Community in Geothermal Boratic Sinters. Ghosh W. e altri, in «Geomicrobiology Journal», Vol. 29, n. 10, pp 879-885, aprile 2012.

Origin of First Cells at Terrestrial, Anoxic Geothermal Fields. Mulkidjanian A.Y. e altri, in «Proceedings of the National Academy of Sciences», Vol. 109, n. 14, pp. E821-E830, aprile 2012.

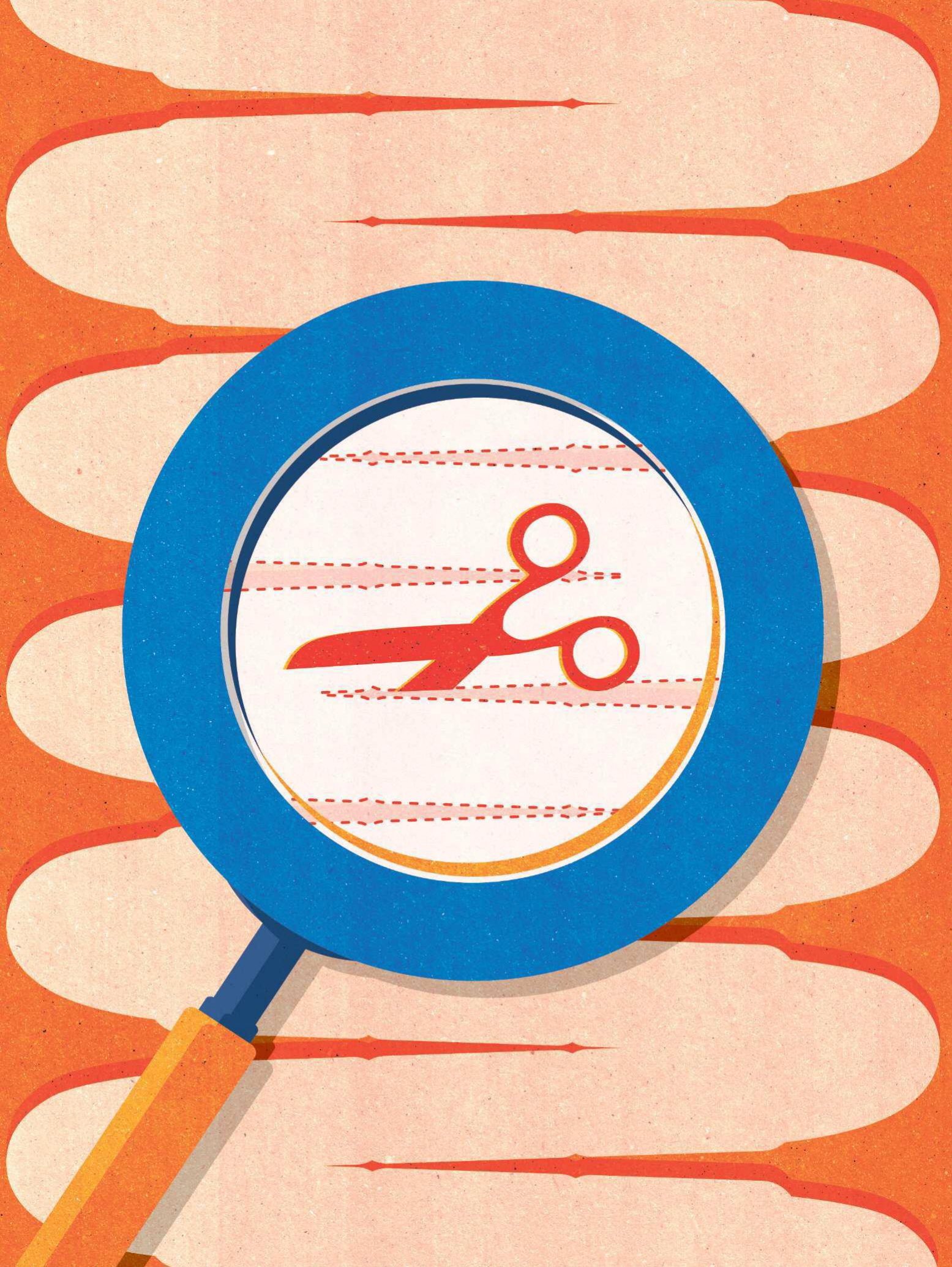
Ester-Mediated Amide Bond Formation Driven by Wet-Dry Cycles: A Possible Path to Polypeptides on the Prebiotic Earth. Forsythe J.G., in «Angewandte Chemie International Edition», Vol. 54, n. 34, pp. 9871-9875, agosto 2015.

Hydrothermal Conditions and the Origin of Cellular Life. Deamer D.W. e Georgiou C.D., in «Astrobiology», Vol. 15, n. 12, pp. 1091-1095, dicembre 2015.

A Field Trip to the Archaean in Search of Darwin's Warm Little Pond. Damer B., in «Life», Vol. 6, n. 2, articolo n. 21, giugno 2016.

Earliest Signs of Life on Land Preserved in ca. 3.5 Ga Hot Spring Deposits. Djokic T. e altri, in «Nature Communications», Vol. 8, articolo n. 15263, maggio 2017.

La vita sulla Terra. Ricardo A. e Szostak J.W., in «Le Scienze» n. 495, novembre 2009.



MEDICINA

OPERAZIONE diabete

Gli interventi chirurgici che modificano l'apparato gastrointestinale liberano dal diabete, e nuove prove mostrano che l'intestino stesso, non solo l'insulina, potrebbe essere responsabile della malattia

di Francesco Rubino

Illustrazione di Kotryna Zukauskaite

Francesco Rubino, medico e ricercatore, presiede il Dipartimento di chirurgia metabolica e bariatrica del King's College di Londra e opera come chirurgo al King's College Hospital. Riceve compensi come membro dei comitati di consulenza scientifica di GI Dynamics e Fractyl, aziende impegnate nello sviluppo di terapie contro il diabete intestinale, ed è consulente di Ethicon e Medtronic, produttori di dispositivi medici.

Quando ho iniziato il tirocinio in chirurgia, una ventina d'anni fa, non vedevo l'ora di occuparmi di tumori, calcoli alla cistifellea, ernie e qualsiasi altra malattia fosse a portata del mio bisturi. La chirurgia sembrava una soluzione immediata a molti disturbi gravi.

Il diabete di tipo 2 non era uno di questi. Gli interventi chirurgici si concentrano su un'unica parte dell'organismo, mentre notoriamente il diabete danneggia vari organi e provoca un'incapacità generalizzata di usare in modo efficiente l'insulina, un ormone che regola la glicemia. Era evidente che il problema non poteva essere risolto semplicemente incidendo o asportando una parte del corpo.

In un pomeriggio dell'estate 1999, però, le mie conoscenze sul diabete, e la mia carriera, hanno preso una svolta inaspettata.

Mi ero appena trasferito dall'Italia a New York per partecipare a un progetto di ricerca in chirurgia mininvasiva all'attuale Icahn School of Medicine del Mount Sinai Hospital. Mentre ero in biblioteca a studiare alcuni aspetti tecnici relativi a un'operazione chiamata «diversione biliopancreatica» ho scoperto qualcosa di insolito. Questo tipo di intervento è eseguito su pazienti gravemente obesi per ridurne il peso, e consiste nell'accorciare il percorso del cibo nell'intestino, aggirando segmenti intestinali che assorbono le sostanze nutritive. Mentre leggevo che molti pazienti sottoposti a questa operazione erano affetti da diabete di tipo 2, legato all'obesità, mi ha stupito scoprire che già un mese dopo l'intervento il loro livello di glucosio nel sangue era tornato nella norma, nonostante non avessero ancora perso molto peso, mangiassero senza alcuna restrizione in termini di calorie e di zuccheri e non assumessero farmaci antidiabetici. Inoltre, ad anni di distanza dall'operazione la maggior parte di loro non soffriva più di diabete.

Ero davvero perplesso. Come era possibile che un intervento chirurgico risolvesse i problemi di glicemia legati a una malattia che tutti i libri di testo definivano cronica, progressiva e infine irreversibile? In teoria il diabete poteva essere tenuto sotto controllo, ma non poteva scomparire.

Mentre mi scervellavo per trovare una spiegazione, mi sono ricordato che l'intestino tenue produce ormoni che stimolano il pancreas a produrre un supplemento di insulina. Forse l'alterazione chirurgica dell'anatomia influiva su questi ormoni ripristinando il normale metabolismo del glucosio? O forse l'intestino era sede di altri meccanismi patologici che l'intervento riusciva a correggere? In questo caso la chirurgia sarebbe potuta diventare una valida terapia per il diabete, e capire come si generava questo effetto ci avrebbe permesso di risalire alla tanto misteriosa causa della malattia.

All'epoca — eravamo alla fine degli anni novanta — stavamo appena iniziando ad accorgerci che il diabete dilagava nel mondo come un'epidemia, che dura ancora oggi. Le stime più recenti dell'International Diabetes Federation e dell'Organizzazione mondiale della Sanità indicano che almeno 415 milioni di persone nel mondo sono affette da questa malattia, e secondo le previsioni si dovrebbero raggiungere i 650 milioni entro il 2040. (Il 90 per cento dei malati soffre di diabete di tipo 2, e solo il restante 10 per cento è affetto dal tipo 1, che si manifesta quando il pancreas non produce insulina a sufficienza.) Individuando la causa e trovando una cura si potrebbero salvare milioni di vite.

Dopo una notte insonne, emozionato dai nuovi possibili sviluppi, ho sottoposto al mio tutor, il chirurgo Michel Gagner, l'idea che avevo elaborato, e che secondo lui aveva delle potenzialità. Insieme ci siamo rivolti ai dirigenti della nostra scuola di medicina per chiedere di poter eseguire un test clinico sugli esseri umani e valutare se con la chirurgia fosse possibile ottenere benefici maggiori che con le terapie convenzionali, anche nei malati non obesi. La nostra richiesta è stata ripetutamente respinta sia in quella sia in altre occasioni nei mesi successivi.

Il rifiuto è stato una delusione, ma forse era prevedibile: da secoli le terapie antidiabetiche sono centrate su diete, farmaci e iniezioni. Operare i malati per asportare segmenti intestinali deve essere sembrata un'eresia, oltre che un rischio assurdo, perché si riteneva che la causa fosse da ricercarsi in una qualche disfunzione delle cellule pancreatiche che producono l'insulina, nonché nei processi con cui l'organismo usa questo ormone.

Vent'anni dopo, quell'eresia è comunemente accettata.

Ci sono ormai decine di studi sugli animali e almeno 12 trial clinici randomizzati e controllati, effettuati su centinaia di persone, in cui sono stati eseguiti interventi chirurgici bariatrici per provare a curare il diabete di tipo 2. Tutte queste ricerche dimostrano che la riduzione chirurgica della superficie del tratto ga-

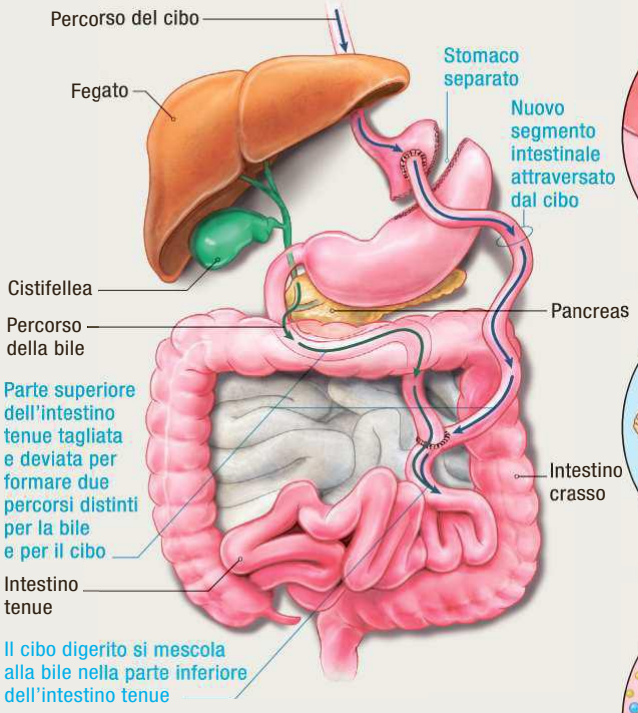
IN BREVE

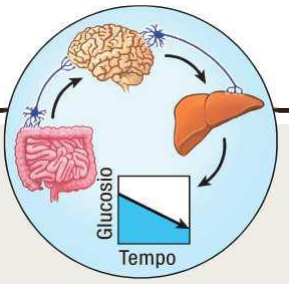
Quarantacinque organizzazioni mediche raccomandano la chirurgia per la perdita di peso come terapia standard contro il diabete di tipo 2.
Numerosi studi clinici dimostrano che la chirurgia permette di tenere sotto controllo il diabete in modo più efficace, rapido e duraturo rispetto alla dieta e ai farmaci.
Il successo chirurgico collega diabete e intestino, e potrebbe dipendere da un'alterazione degli ormoni intestinali, degli acidi biliari o dei batteri intestinali, oppure dalla rimozione di una causa della malattia.

Tagliare fuori il diabete

Gli interventi chirurgici per la riduzione del peso, che modificano l'anatomia del tratto gastrointestinale, si sono rivelati efficaci contro il diabete di tipo 2 e sono attualmente raccomandati come terapia antidiabetica da oltre 40 diverse organizzazioni mediche. I ricercatori hanno iniziato a identificare i meccanismi con cui la chirurgia può migliorare il controllo della glicemia.

Un'operazione comune, il bypass gastrico Roux-en-Y, accorcia la parte superiore dell'intestino, in cui gli alimenti si mescolano con i succhi gastrici. Questo non solo riduce le calorie assorbite, ma limita anche la stimolazione delle cellule intestinali da parte dei nutrienti di passaggio.



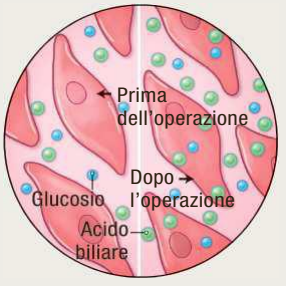


I circuiti nervosi

Nell'intestino ci sono diramazioni nervose, come il nervo vago, che trasmettono segnali da e verso il cervello. Quando l'intestino rileva il passaggio di nutrienti, questi circuiti neurali avvertono il cervello, che a sua volta segnala al fegato di sospendere la produzione di glucosio. Questo feedback è potenziato dopo le operazioni di bypass gastrointestinale.

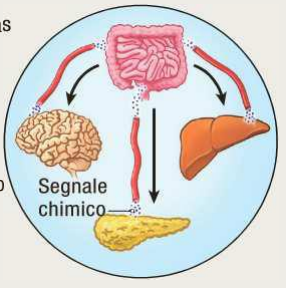
I microbi intestinali

La comunità microbica intestinale influisce sull'efficienza di estrazione dell'energia nel corpo umano. Alterando le caratteristiche del contenuto intestinale, la chirurgia modifica la popolazione microbica. Questo a sua volta può incrementare il metabolismo e migliorare il controllo del glucosio.



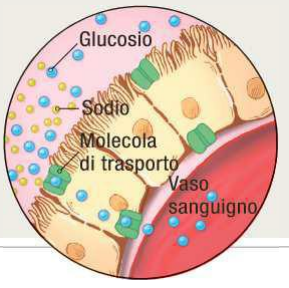
Gli acidi biliari

Gli acidi biliari provenienti da fegato e cistifellea, che fluiscono nella parte superiore dell'intestino tenue e circolano nel sangue come gli ormoni, regolano il metabolismo cellulare. La chirurgia aumenta quantità di acidi biliari circolanti e la sensibilità degli organi all'insulina.



Gli ormoni intestinali

L'intestino tenue contiene cellule che rilasciano ormoni nel sangue quando sono stimolate dai nutrienti. Questi ormoni possono innescare l'attività di fegato, pancreas e altri organi che influiscono sulla glicemia. Le operazioni di bypass gastrico accorciano alcuni segmenti intestinali, quindi modificano la quantità di ormoni rilasciati.



Il trasporto del glucosio

Nella digestione, il glucosio è prelevato dalle particelle di cibo nell'intestino, attraversa il rivestimento intestinale ed entra nel sangue. Il processo è affidato a molecole di trasporto che necessitano di sodio per funzionare. La chirurgia dirotta una fonte primaria di sodio, la bile, ostacolando le molecole di trasporto e abbassando il picco glicemico postprandiale del diabete.

Illustrazione di Mesa Schumacher

strointestinale è più efficace di qualsiasi altra terapia antidiabetica esistente. E questo risultato non è solo una conseguenza della perdita di peso. In molti pazienti i valori glicemici sono rientrati nella norma nell'arco di qualche settimana, molto prima che venisse riscontrata un'effettiva riduzione dei grassi e del peso. In generale, circa il 50 per cento dei pazienti operati non soffre più di diabete, e in alcuni casi l'effetto perdura ad anni di distanza dall'intervento. Nel restante 50 per cento si osservano notevoli miglioramenti nel controllo della glicemia e una drastica riduzione della dipendenza dall'insulina e da altri farmaci.

Questi risultati sono così importanti che l'anno scorso 45 organizzazioni mediche hanno approvato l'impiego della chirurgia gastrointestinale come possibile terapia standard contro il diabete, anche nei malati mediamente obesi. Inoltre le nuove conoscenze sui meccanismi con cui questi interventi all'intestino influiscono sul metabolismo del glucosio hanno ispirato lo sviluppo di terapie non chirurgiche che hanno come obiettivo l'intestino tenue.

Sempre più prove a favore

Nelle settimane successive alla mia stupefacente scoperta in biblioteca, poiché le nostre proposte di sperimentare la chirurgia su malati di diabete venivano respinte, ho approfondito le ricerche nella letteratura medica per trovare riscontri a sostegno della mia idea. Così ho scoperto che da quasi un secolo i medici registravano casi di malati di diabete migliorati dopo un'operazione chirurgica gastrointestinale. Un articolo pubblicato su «The Lancet» nel

1925 descriveva la scomparsa quasi istantanea del glucosio in eccesso nelle urine — sintomo di diabete — di un paziente sottoposto a un intervento gastrointestinale a causa di un'ulcera peptica. Da quando, a metà degli anni cinquanta, i medici hanno iniziato a ricorrere alla chirurgia gastrointestinale per risolvere casi di obesità grave, simili risultati sono diventati più frequenti. Negli anni ottanta e novanta gli effetti antidiabetici di questi trattamenti sono stati descritti in numerose pubblicazioni, tra cui un celebre studio effettuato dal chirurgo Walter Pories dell'East Carolina University e dai suoi colleghi su oltre 120 pazienti, intitolato inequivocabilmente: *Chi l'avrebbe mai detto? Un'operazione chirurgica si dimostra la terapia più efficace per il diabete mellito in età adulta* (*Who Would Have Thought It? An Operation Proves to Be the Most Effective Therapy for Adult-Onset Diabetes Mellitus*.).

Nonostante queste convincenti prove a favore, però, la chirurgia non era presa in seria considerazione come terapia antidiabetica. Uno dei principali ostacoli era la convinzione di molti medici che i suoi effetti positivi sul diabete derivassero dalla perdita di peso post-operazione, e non dall'operazione stessa.

Risolvere la questione, in un modo o nell'altro, era diventato una necessità impellente da quando io e Gagner non eravamo riusciti a far partire i nostri studi clinici. Ho quindi iniziato a studiare i ratti, per capire se modificando chirurgicamente il tratto gastrointestinale fosse possibile influenzare direttamente il metabolismo del glucosio, indipendentemente dalla variazione di peso. Nel frattempo mi ero trasferito allo European Institute of Telesurgery di Strasburgo, in Francia, dove io e i miei colleghi abbiamo eseguito su ratti normopeso con diabete di tipo 2 un *bypass* del duodeno e dell'intestino digiuno (bypass duodeno-digiunale), un'operazione sperimentale che accorcia il tratto intestinale mantenendo invariate le dimensioni dello stomaco al fine di evitare impedimenti meccanici all'assunzione del cibo. In seguito all'intervento, il metabolismo del glucosio nei ratti migliorava, indipendentemente dalle variazioni della dieta e del peso.

A cinque anni di distanza dall'operazione, l'89 per cento dei malati di diabete non assumeva insulina

Altri ricercatori hanno convalidato questi risultati eseguendo lo stesso bypass e altri interventi su diversi modelli animali, e successivamente — all'inizio di questo secolo — su pazienti umani. Nel decennio scorso sono stati effettuati almeno dieci trial clinici randomizzati, e tutti hanno dato esiti analoghi. Uno di questi studi, effettuato da Geltrude Mingrone, dell'Università Cattolica del Sacro Cuore a Roma, insieme a me e ad altri colleghi, ha dimostrato che cinque anni dopo l'intervento del chirurgo più dell'80 per cento dei 38 pazienti operati si era completamente rimesso dalla malattia o era comunque in grado di mantenere i valori glicemici sotto controllo con piccole dosi di farmaci o solo con la dieta e l'esercizio fisico. Da un altro studio, effettuato da Philip Schauer e colleghi della Cleveland Clinic su 96 pazienti operati, è emerso che mentre prima dell'intervento circa il 45 per cento dei partecipanti assumeva insulina, a cinque anni di distanza addirittura l'89 per cento non ne faceva più uso. Secondo il vasto studio Swedish Obese Subjects, la chirurgia potrebbe anche essere più efficace delle terapie standard nella riduzione delle complicanze legate alla malattia, tra cui infarto e ictus, e della mortalità.

La sicurezza di queste procedure è analoga a quella di altre operazioni di routine, come gli interventi alla cistifellea o l'isterectomia, che in genere sono considerate a basso rischio. Diverse analisi economiche indicano che i costi di un intervento (che negli Stati Uniti si aggirano tra i 20.000 e i 25.000 dollari) potrebbero essere compensati nell'arco di due o tre anni dalla riduzione della spesa per i farmaci e l'assistenza medica.

Occhi puntati sull'intestino

Perché la chirurgia funziona così bene? Nessuno lo sa ancora con certezza, ma sembra che il tratto gastrointestinale abbia un ruolo fondamentale sia nel normale metabolismo del glucosio sia nelle disfunzioni associate al diabete. Ci sono almeno cinque fattori tramite i quali l'intestino esercita questa sua influenza: ormoni, acidi biliari, molecole che trasportano il glucosio fuori dall'intestino, microbi intestinali e circuiti neurali.

Il rivestimento del tratto gastrointestinale include cellule specializzate che reagiscono alle sostanze nutritive contenute negli alimenti e ad altri stimoli rilasciando ormoni, che a loro volta stimolano la secrezione di insulina nel pancreas o influiscono sul senso di appetito e di sazietà. L'alterazione chirurgica dell'anatomia del tratto gastrointestinale riduce il tempo necessario al cibo per oltrepassare queste cellule, e di conseguenza il contatto e la stimolazione in alcuni segmenti. Inoltre rende disponibile più cibo per i segmenti successivi. L'esito complessivo è un aumento del livello di alcuni ormoni e un calo della secrezione di altri.

Gli interessanti studi su esseri umani condotti da David Cummings, dell'Università di Washington, hanno dimostrato che le operazioni di bypass gastrico inibiscono la circolazione di grelina, un ormone che induce la sensazione di appetito e che sembra regolare anche l'assorbimento del glucosio da parte di alcune cellule. Carel W. le Roux, attualmente impegnato allo University College di Dublino, e altri ricercatori hanno dimostrato che un intervento di accorciamento dell'intestino chiamato «bypass gastrico Roux-en-Y» e altre procedure simili aumentano il livello di altri ormoni, detti incretine, che incrementano la produzione di insulina.

La chirurgia gastrointestinale per la perdita di peso agisce anche sugli acidi biliari, un altro tipo di molecole che regolano il consumo di energia dell'organismo. Noti soprattutto per il ruolo svolto nella digestione degli alimenti, gli acidi biliari entrano anche nell'apparato circolatorio e inviano segnali ai recettori cellulari in vari organi e tessuti. Questi segnali inducono le cellule ad aumentare il consumo di lipidi e glucosio. La chirurgia gastrica può incrementare il livello di acidi biliari circolanti, aiutando le cellule a prelevare glucosio dal sangue. Gli studi dimostrano inoltre che gli acidi biliari possono impedire ad alcune cellule del sistema immunitario, i macrofagi, di accumularsi nei tessuti lipidici. Un numero più piccolo di macrofagi riduce infiammazione e resistenza all'insulina tipiche dell'obesità e del diabete di tipo 2.

La chirurgia può influire anche su un altro processo che contribuisce al diabete: il trasporto del glucosio. Durante la digestione, nell'intestino avviene la degradazione delle particelle di cibo da cui viene estratto il glucosio, che attraversa quindi il rivestimento intestinale ed entra nel sangue con l'aiuto delle molecole di trasporto. Queste ultime necessitano di alte concentrazioni di sodio per funzionare regolarmente. Diverse tipologie di interventi ga-

strici modificano il percorso di alcuni tratti dell'intestino attraversati dagli alimenti, aggirando le fonti primarie di sodio, cioè bile e succhi gastrici del pancreas. In assenza di sodio, l'attività delle molecole di trasporto del glucosio è rallentata in modo significativo, e questo a sua volta migliora il controllo del glucosio nel sangue riducendo il picco glicemico dopo un pasto.

Anche i microbi intestinali potrebbero essere responsabili degli effetti benefici della chirurgia. Il tratto gastrointestinale ospita migliaia di miliardi di microrganismi, alcuni dei quali aiutano l'organismo a ricavare energia dagli alimenti e producono sostanze che riducono infiammazione e resistenza all'insulina. Alterando l'acidità dell'intestino, e la quantità e la composizione chimica delle sostanze nutritive al suo interno, la chirurgia gastrointestinale può modificare la popolazione microbica locale. Lee Kaplan, della Harvard Medical School, e colleghi hanno dimostrato che un simile cambiamento può influire sul metabolismo. Inizialmente hanno eseguito un'operazione di bypass gastrico su un gruppo di topi, quindi hanno prelevato popolazioni di batteri dal loro intestino e le hanno trapiantate in topi non operati, i cui batteri nativi erano stati già asportati. Il secondo gruppo di topi è stato sottoposto a una dieta ricca di grassi. Il loro peso è aumentato poco e il loro metabolismo è migliorato parecchio in confronto ai roditori a cui erano stati trapiantati i batteri di topi non operati.

Un altro effetto noto della chirurgia coinvolge i circuiti nervosi che influiscono sul metabolismo. Uno di questi, per esempio, che collega l'intestino al cervello tramite il nervo vago, permette all'intestino tenue di percepire minuscole quantità di sostanze nutritive ingerite e di informarne il cervello, che a sua volta sospende la produzione di glucosio nel fegato, abbassando di conseguenza la glicemia generale. Gli esperimenti su roditori effettuati da Tony Lam, dell'Università di Toronto, e colleghi hanno dimostrato che gli interventi di bypass gastrointestinale aumentano l'attività di questi meccanismi.

Infine, è possibile che la chirurgia rimuova alcuni sistemi di blocco dell'insulina nell'intestino responsabili del diabete. Questa teoria si fonda sull'idea per cui le incretine, gli ormoni che stimolano l'insulina, debbano avere un «contrappeso», altrimenti inonderebbero l'organismo di insulina dopo ogni pasto. Se un'ondata di insulina ripulisse tutto il glucosio dalla circolazione sanguigna, ognuno di noi, dopo mangiato, soffrirebbe di ipoglicemia, vale a dire di basso contenuto di glucosio nel sangue. Poiché invece non entriamo tutti in coma ipoglicemico dopo ogni pasto, è evidente che esiste qualcosa capace di bloccare l'attività delle incretine. L'azione eccessiva di questo contromeccanismo potrebbe sopprimere del tutto la reazione dell'organismo all'insulina: in altre parole, potrebbe provocare il diabete di tipo 2. Non sono ancora state identificate con certezza sostanze di questo tipo, che io chiamo «anti-incretine», ci sono però alcune ipotesi.

Ormoni intestinali come somatostatina-28 e galanina riducono la secrezione dell'insulina nei roditori. Ma ci sono anche altri esempi. Nel 2013 Mingrone e collaboratori hanno prelevato una serie di proteine non identificate da un segmento del tratto gastrointestinale di topi diabetici. Una volta iniettate in topi non diabetici, le proteine hanno innescato una forte resistenza all'insulina. Le proteine hanno agito allo stesso modo dopo essere state iniettate in normali cellule muscolari umane coltivate in laboratorio. La mia ipotesi è che il bypass gastrico possa ridurre la quantità o la disponibilità di queste anti-incretine che bloccano l'insulina, ripristinando un normale equilibrio metabolico nell'organismo.

Qualunque sia l'esatto procedimento, questa e altre osservazioni sembrano indicare che il diabete abbia un'origine gastrointestinale. Le disfunzioni di alcuni meccanismi intestinali innescate dagli alimenti spiegherebbero anche come l'aumento globale di alimenti grassi e ricchi di carboidrati registrato negli ultimi anni, combinato con l'aumento della disponibilità generale di cibo in molti paesi, possa aver provocato un'epidemia della malattia.

Dispositivi antidiabetici

Pur essendo un rimedio molto efficace, la chirurgia non potrà mai diventare una soluzione di massa per un problema così diffuso: richiede ospedali e personale altamente qualificato, e comunque comporta un certo grado di rischio, inevitabile quando si usa un bisturi. Servono rimedi meno invasivi. Almeno uno di questi potrebbe già essere disponibile: un piccolo manicotto da inserire nell'intestino passando per la gola e lo stomaco.

L'idea è foderare il duodeno, la sezione gastrointestinale situata appena sotto lo stomaco, in cui gli acidi biliari e pancreatici si mescolano al cibo parzialmente digerito, alterando le caratteristiche chimiche di tutto ciò che prosegue il suo percorso nell'intestino. Operando in questo punto cruciale è possibile intervenire anche sui segmenti a valle e sulla maggior parte dei meccanismi di controllo del glucosio descritti in precedenza.

In una serie di esperimenti, io e i miei colleghi abbiamo «schermato» il duodeno di ratti diabetici inserendo una cannula flessibile di silicone che lasciava scorrere via i nutrienti da questa sezione. Le particelle di cibo non entravano mai in contatto con le cellule di rivestimento del duodeno né si mescolavano alla bile. La glicemia migliorava notevolmente. Poi però abbiamo praticato alcuni fori nella cannula, lasciando uscire i nutrienti. Questa modifica ha compromesso gli effetti antidiabetici.

Esistono già tubi di plastica flessibili per schermare il duodeno negli esseri umani, sviluppati per simulare gli effetti di un bypass gastrico senza dover ricorrere alla chirurgia. Il loro impiego è già stato approvato in Europa e Sud America. I pazienti sottoposti alla procedura di inserimento hanno manifestato un netto miglioramento dei sintomi del diabete. Un metodo più recente, in fase di sperimentazione sugli esseri umani, consiste nell'inserire nel duodeno, attraverso la gola, un dispositivo alla cui estremità è collocato un palloncino. Quest'ultimo è poi riempito di acqua calda per bruciare alcune cellule che normalmente reagiscono al passaggio delle sostanze nutritive. I primi test hanno dato esiti promettenti sui malati di diabete di tipo 2 e sono in corso ulteriori analisi per confermare la durata di questo effetto sul lungo periodo.

Non è la prima volta nella storia della medicina che la chirurgia apre la strada a terapie di altro genere. Non è nemmeno la prima volta nella storia del diabete. Nel 1889 Oskar Minkowski indusse il diabete in alcuni cani asportandone il pancreas, e il suo lavoro ha portato Frederick Banting e Charles Best a scoprire l'insulina nel 1921. Quasi un secolo dopo, il successo della chirurgica ha permesso di individuare nel tratto gastrointestinale un possibile bersaglio per nuove terapie antidiabetiche, un approccio che mi auguro possa aiutare i pazienti al pari, se non di più, delle iniezioni di insulina. ■

PER APPROFONDIRE

Mechanisms underlying Weight Loss after Bariatric Surgery. Miras A.D. e le Roux C.W., in «Nature Reviews of Gastroenterology and Hepatology», Vol. 10, n. 10, pp. 575-584, ottobre 2013.

Time to Think Differently about Diabetes. Rubino F. in «Nature», Vol. 533, pp. 459-461, 26 maggio 2016.

AGRICOLTURA

COSTRUIRE UN RACCOLTO MIGLIORE

Illustrazioni di Cherie Sinnen

Gli scienziati stanno imparando a manipolare le complesse conversazioni che le piante hanno con microrganismi, parassiti, nutrienti e altri elementi del fitobioma nella speranza di evitare una carestia futura

di Marla Broadfoot

Marla Broadfoot è una giornalista scientifica freelance e collabora con «American Scientist». Vive a Wendell, in North Carolina, e ha un dottorato di ricerca in genetica e biologia molecolare.

Mercedes Diaz si fa strada nel fango di un campo di soia e fa scorrere le dita, coronate da uno smalto vivace, tra i rami di decine di piante che le arrivano al ginocchio, controllando steli, baccelli e foglie mentre elenca sottovoce una lista di possibili problemi: *Maruca vitrata*, *Cercospora sojina*, *Sclerotinia sclerotiorum*. Quando nota le macchie su un viluppo di foglie esclama: «*Fusarium virguliforme*!», poi ne strappa una e me la passa.

Grande come il palmo della mia mano, la foglia è rinsecchita e ha la superficie crivellata di buchi irregolari accanto a brutte macchie marroni venate di giallo: sono gli effetti di una tossina prodotta dal fungo di quella che è chiamata sindrome di morte improvvisa della soia, una tossina che scorre nella pianta derubandola dei baccelli e mangiandone le foglie dall'interno. La morte improvvisa della soia dovuta a *F. virguliforme* è una delle malattie più letali per i raccolti negli Stati Uniti; secondo la United Soybean Board, l'associazione dei produttori statunitensi di soia, ha causato una perdita di oltre 1,6 milioni di tonnellate di produzione nel 2014. Eppure Diaz non potrebbe essere più felice di vederla nel suo campo.

Diaz è una fitopatologa, una delle migliaia di ricercatori a caccia di nuovi modi per proteggere le coltivazioni dalle minacce e aumentare drasticamente la produttività. Nel 2016 il suo gruppo di ricerca ha rivestito semi con migliaia di microrganismi diversi e li ha piantati in mezzo milione di campi distribuiti nel Midwest e nel sud degli Stati Uniti, accanto a lotti di controllo con semi non trattati. Lungo il perimetro di queste aree i ricercatori hanno collocato lotti sentinella con varietà sensibili alle malattie, che fanno le veci del tradizionale canarino nella miniera di carbone segnalando i problemi che possono raggiungere il resto delle colture. Quando Diaz trova la morte improvvisa della soia o un'altra malattia nei lotti sentinella ma non nei lotti del test, può voler dire che i microrganismi stanno facendo il loro lavoro, favorendo la produzione di coltivazioni più sane e abbondanti.

Ma oggi, sotto la pioggia dell'ultimo giorno di settembre del 2016, Diaz scopre che sia i lotti del test sia quelli di controllo sono sfuggiti al destino dei lotti sentinella. I microrganismi non hanno fatto alcuna differenza. Oppure sì? Anche un aumento di 400 chilogrammi per ettaro nella produzione (su una media di circa 3,7 tonnellate per ettaro per la soia) sarebbe quasi impossibile da riconoscere a occhio nudo. La fitopatologa dovrà aspettare che si mietano le piante e si analizzino i dati, prima di sapere se qualcuno dei microrganismi ha avuto un effetto positivo.

La ricerca sulle colture tende a essere un lavoro lento e incerto, ma studiosi come Diaz hanno l'impressione di correre contro il tempo. Se nei prossimi decenni l'agricoltura non cambierà radicalmente, potremmo non avere cibo per tutti. Si stima che la popolazione mondiale aumenterà da 7,5 a 9,7 miliardi di persone entro il 2050; per sfamare tutte quelle bocche in più, e soddisfare diete che includono più carne, secondo la Food and Agriculture Organization (FAO) gli agricoltori dovranno aumentare la produzione di cibo del 70 per cento. È un compito arduo, reso ancora più arduo da diverse tendenze preoccupanti: a livello globale l'estensione dei terreni coltivabili sta diminuendo come risultato di urbanizzazione e cambiamento climatico, tra gli altri fattori; secondo la FAO, gli aumenti della produzione annuale per le colture alimentari essenziali hanno raggiunto una fase di stallo; l'uso dei fertilizzanti, per esempio, è arrivato al punto in cui continuare a versare altre sostanze nei campi farebbe probabilmente più male che bene, e nemmeno le colture geneticamente modificate, spauracchio e prodigio dell'agricoltura allo stesso tempo, hanno saputo mantenere la promessa di potenziare drasticamente la produzione alimentare.

«Dobbiamo smetterla di cercare singole soluzioni definitive», afferma Jan Leach, fitopatologa della Colorado State University. «Non è un problema che qualcuno di noi possa risolvere da solo, ci vorranno gruppi molto diversi tra loro, e dovremo collaborare come non abbiamo mai collaborato prima». Leach e altri scienziati sostengono un approccio più olistico, che consideri il modo in cui tutti i componenti di un campo (piante, terreno, microrganismi, insetti e clima, che insieme formano il cosiddetto fitobioma) interagiscono per determinare la produttività di una data coltura. L'idea fa riferimento agli scritti dei naturalisti ottocenteschi Alfred Russel Wallace e Charles Darwin, che presentavano la natura come una vasta rete interconnessa dove le specie si adattano costantemente ai cambiamenti dell'ambiente che le circonda.

Prendiamo la soia che Diaz ama tanto. Quando un insetto si posa su una foglia, la pianta può rispondere secernendo sostanze

IN BREVE

Per rispondere al fabbisogno alimentare mondiale, gli scienziati stanno imparando a sfruttare il cosiddetto fitobioma, vale a dire la complessa rete che unisce le coltivazioni con le comunità microbiche, il terreno, le condizioni atmosferiche, gli animali e altri fattori ambientali.

Tra le innovazioni più promettenti ci sono semi rivestiti di batteri o funghi che possono rilevare la presenza di parassiti oppure promuovere la crescita in altri modi. I primi prodotti di questo tipo sono già stati messi in commercio.

Gli interventi legati al fitobioma sono probabilmente meno controversi rispetto ai semi geneticamente modificati, tuttavia presentano alcuni rischi potenziali. In ogni caso, la biotecnologia da sola non può risolvere il problema della fame nel mondo.

volatili dalle radici, che di conseguenza possono alterare la composizione microbica del terreno. I microrganismi possono quindi attivare una serie di geni nelle piante vicine, allertandole contro un potenziale attacco. Queste importanti forme di difesa delle piante sono però sensibili a diversi fattori ambientali e possono, per esempio, essere vulnerabili ai cambiamenti climatici. Anche gli agenti patogeni hanno a disposizione trucchi straordinari. Alcuni possono farsi lanciare dalla superficie di una foglia come se fossero palle di cannone per poi lasciarsi trasportare dalle correnti d'aria da un campo all'altro e anche da un continente all'altro. Dalle nuvole, alcuni ceppi di microrganismi volanti possono perfino influire sulle condizioni atmosferiche, portando a pioggia e grandine che li fanno tornare a terra.

La scienza conosce questa complessità da secoli, ma solo di recente i progressi della tecnologia hanno permesso di tracciare uno schema di questo intrico di interazioni nella speranza di sviluppare soluzioni sistematiche e più sostenibili per l'agricoltura. Grazie agli strumenti di sequenziamento genetico i ricercatori possono ormai misurare tutti i microrganismi nel terreno, comprese le varietà più rare e i ceppi più particolari che sono impossibili da coltivare in laboratorio. Possono seguire l'andamento di queste comunità microbiche nello spazio e nel tempo, forse in seguito a un aumento di fertilizzante o a un abbassamento delle temperature. Possono tenere traccia delle conversazioni tra microbi, piante e altri organismi e cercare di decifrare come queste comunicazioni chimiche influiscano su produttività e salute delle colture.

Un giorno gli agricoltori potrebbero essere in grado di andare nei campi con trattori appositamente attrezzati e ottenere un censimento completo dei microrganismi, oltre ai dati più tradizionali dell'«agricoltura di precisione» come i livelli di umidità e di nutrienti nel terreno. Questi fattori potrebbero poi essere combinati con i dati relativi ai raccolti precedenti, ai potenziali parassiti e agenti patogeni e alle proiezioni meteorologiche per prevedere quale combinazione di semi, nutrienti, agenti chimici e microrganismi possa dare il miglior raccolto.

In realtà il movimento per trasformare questa visione è appena agli inizi. Lo scorso anno un gruppo di scienziati provenienti da ambiti diversi ha presentato un progetto ambizioso per trasformare il futuro dell'agricoltura ufficialmente chiamato *Phytobiomes: A Roadmap for Research and Translation* o, in breve, *Phytobiomes Roadmap*, la «tabella di marcia dei fitobiomi». Oltre alla tabella di marcia hanno visto la luce la rivista accademica «Phytobiomes» e Phytobiomes Alliance, una collaborazione tra industria e istituzioni accademiche che vede la partecipazione di oltre una decina di soggetti, dai neofiti come BioConsortia e Indigo ai nomi noti come Bayer e Monsanto, l'azienda per cui lavora Diaz. Negli ultimi anni queste aziende hanno fatto enormi investimenti in ricerca e sviluppo per cercare di assicurarsi una fetta del mercato mondiale delle sostanze biologiche destinate all'agricoltura, che dovrebbe raggiungere i 10 miliardi di dollari entro il 2020.

Le aziende considerano essenziale la terra sotto i nostri piedi, con la sua vasta rete di microrganismi residenti. Batteri e funghi nel terreno possono aiutare le piante a crescere, far fronte a stress, rinforzare le risposte immunitarie e tenere lontani parassiti e malattie. Gli agricoltori ne sanno qualcosa fin dalla fine del XIX secolo, quando iniziarono a trattare i campi di piselli e fagioli con batteri del genere *Rhizobium*, che aumentano la quantità di azoto nel terreno. Oggi sono in commercio decine di prodotti basati sul microbioma del terreno, e altri sono in arrivo. In collaborazione con la danese Novozymes, Monsanto punta molto sui semi rivestiti di microrganismi sviluppati nell'enorme esperimento a cui partecipa Diaz. Altri ricercatori stanno esplorando vie diverse, per esempio alterando il genoma delle piante coltivate in modo da attirare microrganismi utili o manipolando la comunicazione tra piante e parassiti per permettere alle coltivazioni di riconoscere meglio le minacce e rispondere. Data la complessità del fitobioma, le vie possibili per influenzarlo sono infinite. Ma sono infiniti anche i vicoli ciechi. La sfida sta nell'ottenere un risultato in tempo per evitare una carestia.

Note dal sottosuolo

A un'ora da St. Louis, in Missouri, i campi di mais hanno un aspetto pallido e appassito nella luce di metà settembre, mentre quelli di soia ricordano tappeti a pelo lungo degli anni settanta, tinti di verde avocado e giallo polenta. Insieme a Diaz e colleghi ci rechiamo in un sito non contrassegnato alle porte di Stonington, in Illinois. Mentre attraverso una pozzanghera, tiro fuori la mia copia della mappa del campo che indica la posizione delle migliaia di semi rivestiti di microrganismi e piantati nel terreno. I microrganismi sono stati coltivati in fusti di brodo ricco, poi cosparsi sui semi all'interno di enormi vasche di acciaio inossidabile e infine congelati fino al momento della semina. Quando i semi germogliano, i microrganismi prendono vita, ma quello che succede in seguito è determinato dalla miriade di fattori che costituiscono il fitobioma.

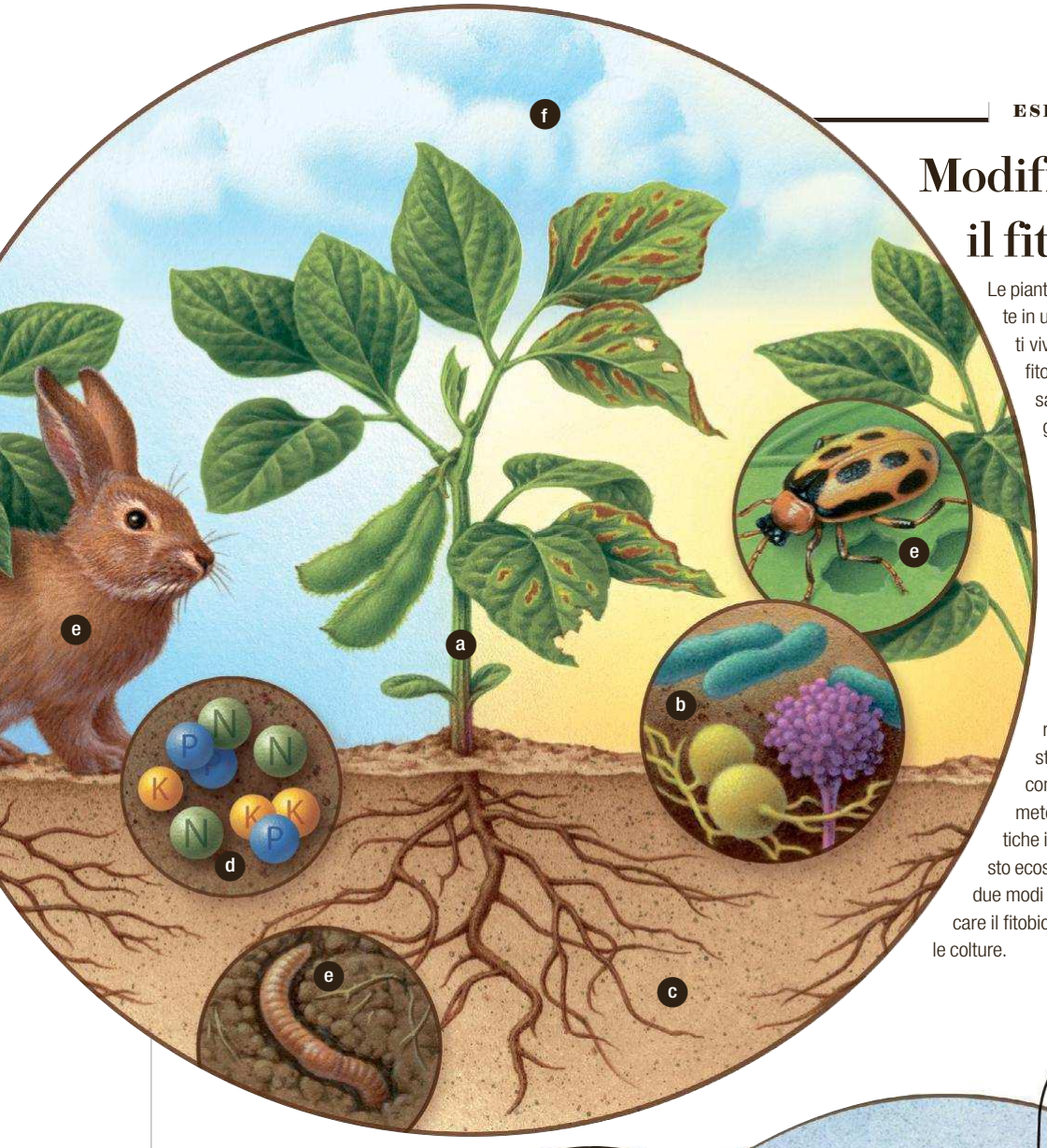
Con l'aumento della popolazione mondiale da 7,5 a 9,7 miliardi di persone previsto entro il 2050, gli agricoltori dovranno incrementare la produzione alimentare del 70 per cento se vorremo sfamare tutte quelle bocche in più

Entro in un labirinto di piante di mais con Diaz, che mi mostra le pannocchie di diverse piante sentinella coperte di una muffa rosa che pullula di minuscole mosche bianche. Le piante non hanno un vero e proprio sistema immunitario, ma hanno sviluppato una serie di strategie per proteggersi dagli insetti. Alcune possono ispessire le pareti cellulari, in modo che gli intrusi non riescano a penetrare, altre inviano sostanze tossiche alle radici o alle foglie, per renderle meno appetibili. Nicotina, caffeina e anche i tannini, che danno al vino rosso la sua qualità astringente, sono tutti prodotti di difesa delle piante.

Secoli di selezione hanno permesso di aumentare la produttività delle colture alimentari e decenni di ingegneria genetica hanno introdotto tratti desiderabili in diverse varietà di coltivazioni. Per esempio, più della metà del mais coltivato attualmente negli Stati Uniti contiene un gene proveniente da un batterio letale per gli insetti, *Bacillus thuringiensis* o Bt, che permette alle piante di distruggere le larve di coleottero. Gli scienziati cercano altri tratti collegati al fitobioma che possano aiutare a promuovere la salute delle piante; hanno scoperto che le piante usano fino al 30 per cento della propria energia per cercare di attrarre i microrganismi giusti e di respingere quelli sbagliati. Jeffery Dangl, fitobiologo all'Università della North Carolina a Chapel Hill, studia possibili alterazioni del genoma delle piante per coltivare ulteriormente

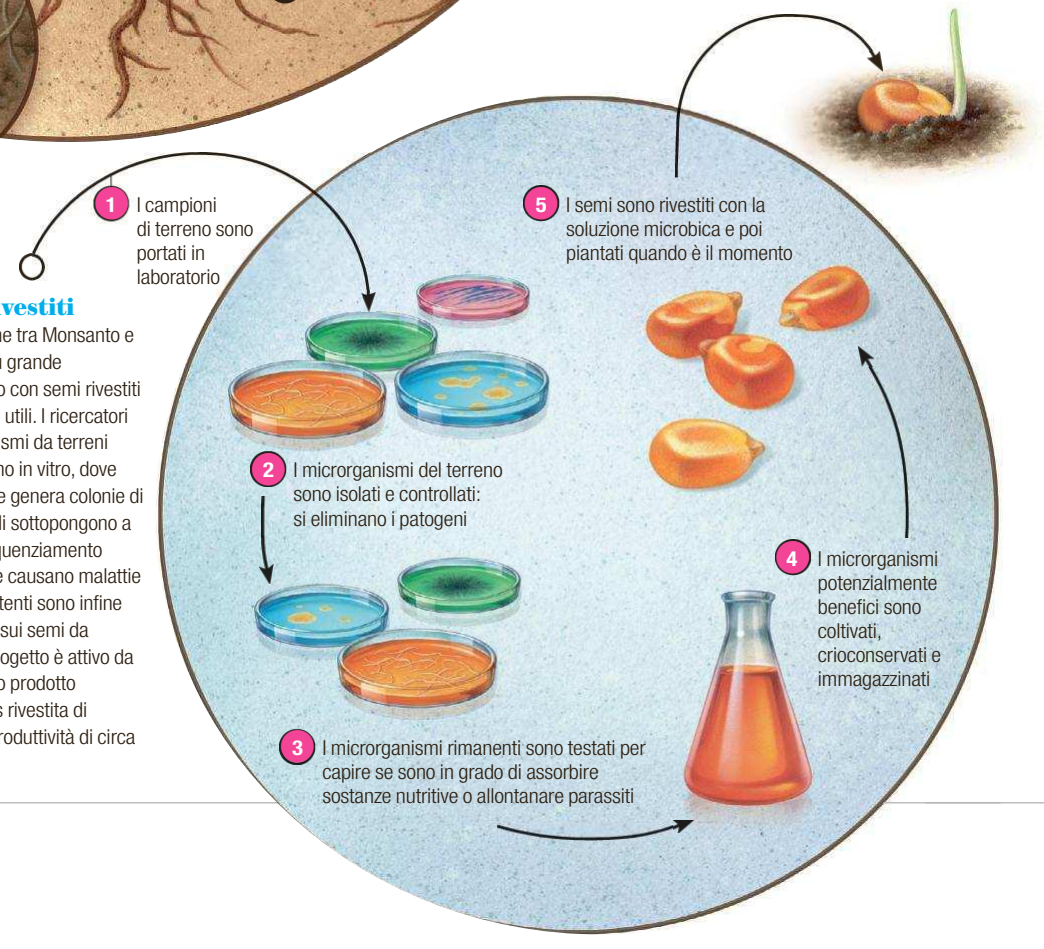
Modificare il fitobioma

Le piante delle coltivazioni **a** sono impegnate in uno scambio continuo con gli elementi viventi e inorganici del loro ambiente o fitobioma. Questo dialogo influisce sulla salute della pianta stessa. Batteri, funghi e virus **b** su foglie, steli e radici oppure nell'aria e nel terreno possono costituire un incentivo o un ostacolo. La qualità del terreno **c** può alterare il ciclo dell'acqua, del carbonio e dei nutrienti. Di questi ultimi **d**, alcuni come azoto e fosforo spronano la crescita, ma se usati in eccesso nei fertilizzanti chimici causano un degrado del suolo. Animali **e** come i conigli e i coleotteri sono tra i principali elementi di distruzione delle coltivazioni, mentre altri come i lombrichi sono utili. Le condizioni meteorologiche **f** e le alterazioni climatiche influiscono su tutti gli elementi di questo ecosistema. Questo caso di studio mostra due modi in cui gli agronomi cercano di modificare il fitobioma per migliorare la produttività delle colture.



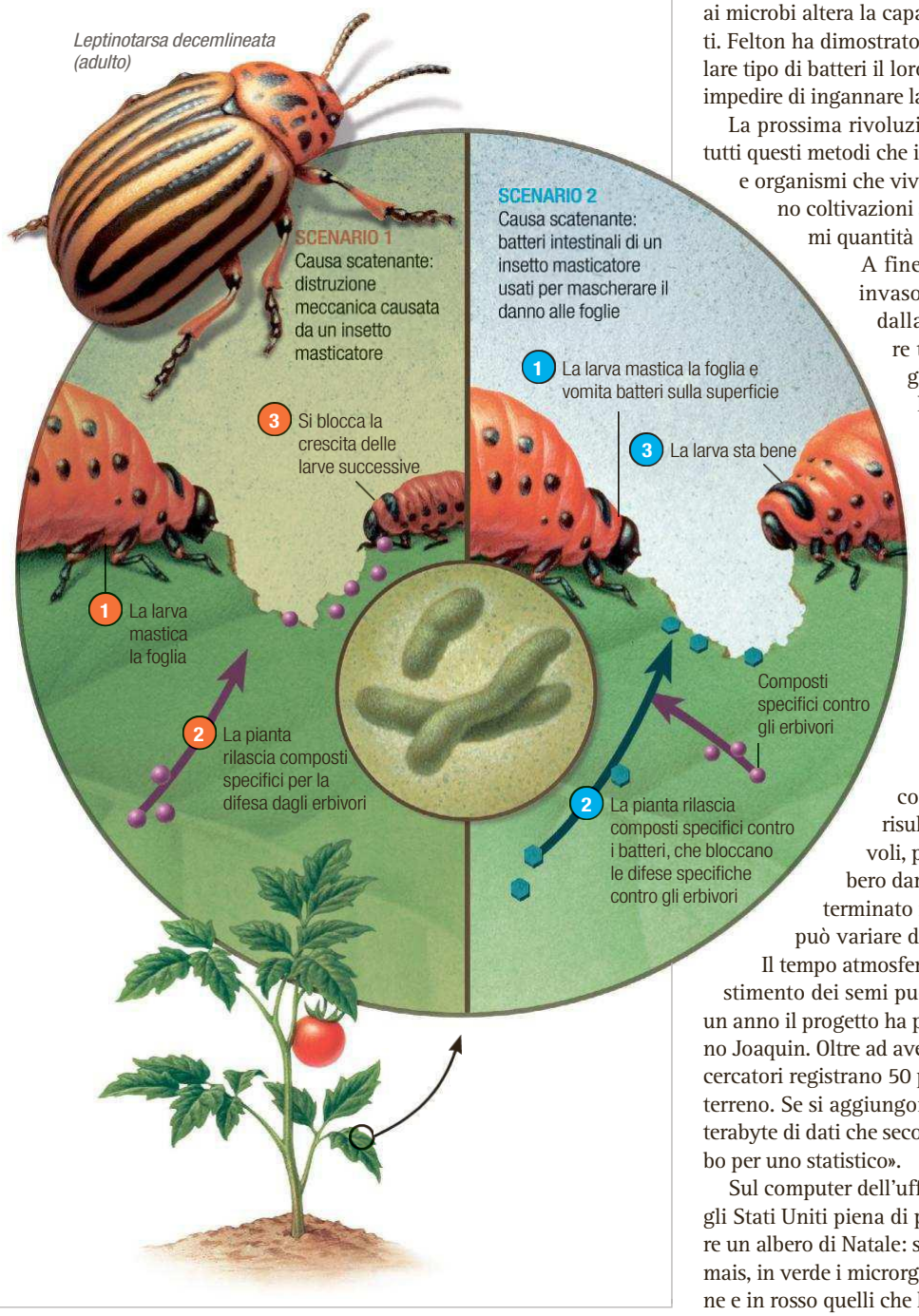
Caso di studio: semi rivestiti

BioAg Alliance, una collaborazione tra Monsanto e Novozymes, sta effettuando il più grande esperimento sul campo al mondo con semi rivestiti di microrganismi potenzialmente utili. I ricercatori raccolgono miliardi di microrganismi da terreni agricoli negli Stati Uniti; li coltivano in vitro, dove l'uno per cento circa sopravvive e genera colonie di forme e colori straordinari; e poi li sottopongono a una serie di test, compreso il sequenziamento genetico, per eliminare quelli che causano malattie note. I microrganismi più promettenti sono infine coltivati in laboratorio e cosparsi sui semi da piantare nei campi per i test. Il progetto è attivo da tre anni e ha già fruttato un primo prodotto commerciale: una varietà di mais rivestita di microrganismi che aumenta la produttività di circa 190 chilogrammi per ettaro.



Caso di studio: interazione microrganismi/erbivori/piante

Le piante non hanno un vero e proprio sistema immunitario, ma sono in grado di rilevare le aggressioni di insetti e batteri, e rispondere. L'attacco di un insetto masticatore può far scattare nella pianta la secrezione di composti che interferiscono con la digestione e la crescita dell'insetto stesso (*scenario 1*); l'attacco di un batterio provoca la secrezione di altri composti antimicrobici. Alcuni insetti, come le larve di dorifora della patata, possono ingannare il loro ospite rigurgitando batteri intestinali sulle foglie: questa strategia porta la pianta a mettere in atto una difesa sbagliata e quindi a lasciare indenni gli insetti (*scenario 2*). Attualmente gli scienziati studiano come smascherare questo inganno.



questo *entourage* microbico; di recente ha scoperto un gene che dà forma alle comunità batteriche che vivono dentro o attorno alle radici delle piante e fa sì che assorbano dal terreno più fosfato, una sostanza nutritiva di cui si stanno esaurendo le scorte.

Altre ricerche sul fitobioma si concentrano sulla resistenza agli insetti. Di solito una pianta è in grado di rilevare la vicinanza dei parassiti grazie a speciali sostanze, dette elicitori, che si trovano nella saliva degli insetti masticatori. Gary Felton, entomologo della Pennsylvania State University, e colleghi hanno scoperto che alcuni coleotteri e bruchi possono mascherare queste molecole rivelatrici sputando sulla foglia i propri microrganismi intestinali, ingannando quindi la pianta per indurla a reagire come se fosse coperta di batteri invece che di insetti. Questa risposta errata ai microbi altera la capacità della pianta di difendersi dagli insetti. Felton ha dimostrato che nutrendo i coleotteri con un particolare tipo di batteri il loro microbioma era alterato a sufficienza da impedire di ingannare la pianta (*si veda il box in questa pagina*).

La prossima rivoluzione verde potrebbe derivare da uno di o tutti questi metodi che influiscono sul dialogo tra piante, parassiti e organismi che vivono nel terreno. Prima di tutto però ci sono coltivazioni sperimentali di cui prendersi cura ed enormi quantità di dati da analizzare.

A fine estate 2016, una flotta di macchine ha invaso i campi dalla Louisiana al Minnesota e dalla North Carolina al Nebraska per mietere tutti i lotti di mais e di soia seminati per gli esperimenti di BioAg Alliance, una collaborazione tra Monsanto e Novozymes. I dati raccolti dai mietitori sono trasmessi in tempo reale al centro elaborazione dati di Monsanto a St. Louis e alla sede di Novozymes nel Research Triangle Park, in North Carolina. In entrambe le sedi gli scienziati restano incollati agli schermi dei propri computer per vedere i numeri che arrivano dai campi. «È come guardare una corsa di cavalli al rallentatore», commenta Scott Schaecher, *data strategy lead* per i dati biotecnologici di Monsanto.

Gli scienziati hanno scoperto che non conviene fare troppo affidamento sui primi risultati. I dati grezzi possono essere ingannevoli, perché non considerano fattori che potrebbero dare un vantaggio o uno svantaggio a un determinato microrganismo. Il microbioma del terreno può variare da zona a zona, anche nello stesso campo. Il tempo atmosferico può mettere tutto a soqquadro: il rivestimento dei semi può essere portato via dalle prime piogge, e un anno il progetto ha perso migliaia di campi a causa dell'uragano Joaquin. Oltre ad avere mezzo milione di punti di raccolta, i ricercatori registrano 50 parametri diversi per ciascun campione di terreno. Se si aggiungono gli altri dati del fitobioma ne risultano terabyte di dati che secondo Schaecher sono «una festa o un incubo per uno statistico».

Sul computer dell'ufficio, Schaecher visualizza una mappa degli Stati Uniti piena di puntini rossi e verdi che la fanno sembrare un albero di Natale: sono i risultati del 2016 in cinque campi di mais, in verde i microrganismi che hanno aumentato la produzione e in rosso quelli che l'hanno fatta diminuire. Il gruppo di ricer-

ca di Schaecher può disaggregare i dati in base alle caratteristiche ambientali e del terreno, alle condizioni meteorologiche e alla pressione di insetti e malattie. Può anche ingrandire le zone che presentano alti livelli della morte improvvisa della soia notata da Diaz, in modo da cercare di identificare quali microrganismi abbiano prosperato in quelle condizioni.

I ricercatori usano una strategia «sul campo», che significa saltare gli esperimenti usuali in serra e testare i candidati direttamente sul terreno, quindi non hanno alcuna idea di quali microrganismi siano eventualmente vantaggiosi. Nel 2014, il primo anno di esperimenti sul campo, hanno piantato semi rivestiti con 500 ceppi diversi di microrganismi, il 90 per cento dei quali ha dato risultati fallimentari. Nel 2015 hanno testato 2000 microrganismi, compresi quelli che avevano avuto successo il primo anno, e alla fine della prova erano rimasti in gara una manciata dei ceppi originali e qualche centinaio dei nuovi. Nel 2016 gli scienziati hanno piantato altri 2000 ceppi, con i migliori degli anni precedenti e una serie di nuovi partecipanti. A tre anni dall'inizio dell'esperimento solo un singolo ceppo del primo gruppo resta in gara, insieme a centinaia di microrganismi degli anni successivi. La squadra di ricercatori non è alla ricerca di meteore, microbi cioè che ottengano un solo successo passeggero, vogliono campioni a tutto tondo che diano risultati continuativi, anno dopo anno, su molti campi.

Lavorare solo con microrganismi naturali può sembrare un metodo innocuo, libero dalle controversie associate agli organismi geneticamente modificati, gli OGM. Tuttavia, anche questa strategia solleva qualche dubbio e preoccupazione

Un azzardo?

Lavorare solo con microrganismi naturali (presi dai terreni agricoli, coltivati in laboratorio e restituiti ai campi) può sembrare un metodo innocuo, libero dalle controversie associate agli organismi geneticamente modificati (OGM). Però solleva alcuni dubbi e preoccupazioni. Un'alterazione dell'ambiente microbico potrebbe modificare il sapore del raccolto, allo stesso modo in cui la composizione del terreno influisce sul gusto del vino. Un batterio che aumenta la produttività potrebbe avere proprietà patogene con effetti deleteri sulla salute umana. L'applicazione prolungata di probiotici alle piante potrebbe modificare le dinamiche naturali del terreno, alimentando la proliferazione di alcuni microrganismi e portando all'estinzione di altri. C'è anche il rischio che il rivestimento dei semi, come molte sostanze distribuite nei campi, si diffonda da una coltura andando a contaminarne altre.

Schaecher sostiene che BioAg Alliance lavora sodo per evitare questi problemi. Sottopone i ceppi microbici a una serie di test prima di introdurli nei campi, sequenzia tutti i genomi per garantire che i microrganismi non abbiano alcuna somiglianza con i patogeni umani noti e fa altri controlli per determinare che non siano tossici per l'ambiente e che non possano diffondersi ad altre colture. Schaecher e il suo gruppo sono in continuo contatto con lo U.S. Department of Agriculture, che decide se sia necessario un permesso prima di iniziare i test nei campi con una data specie di microrganismi. In genere gli organismi con compiti benigni come fissare l'azoto o solubilizzare il fosfato sono autorizzati senza problemi, mentre quelli con incarichi più pericolosi come uccidere altri batteri o funghi richiedono più burocrazia.

La preoccupazione più grande tra gli agronomi non è che una nuova specie prenda il sopravvento o contamini altre colture, ma è che non resista abbastanza da fare una grande differenza, afferma la fitopatologa Gwyn Beattie dell'Iowa State University, tra gli autori della *Phytobiomes Roadmap*. Una cucchiaio di terreno contiene circa 50 miliardi di microrganismi, con anche 10.000 specie diverse. I ricercatori possono aggiungere milioni di microrganismi di un altro ceppo senza fare la differenza. «Se a New York fai entrare una persona alla volta, la stragrande maggioranza di queste persone in entrata non cambia la città», spiega Beattie. «Nella comunità microbica accade lo stesso. Di rado l'introduzione di altri organismi ha qualche impatto, ed è la nostra frustrazione maggiore». Una difficoltà simile ha impantanato l'industria dei probiotici umani, che punta a migliorare la comunità microbica nel nostro intestino composta da migliaia di miliardi di elementi. I suoi rimedi in polvere, pillole o liquidi sono promossi come cura per malanni, dalla diarrea alla depressione, ma sono pochi gli studi che mostrano effetti misurabili.

In ogni caso, le attività di Monsanto preoccupano da tempo grandi segmenti dell'opinione pubblica, che accusano l'azienda di mettere in pericolo la salute umana, calpestare i diritti degli agricoltori e monopolizzare le scorte alimentari. Buona parte dell'opposizione è nata a metà degli anni novanta, quando Monsanto ha lanciato una linea di colture GM. Da allora sono emerse due narrative opposte: secondo una, l'azienda sviluppa semi che raddoppiano la produzione con un'attività eroica che permette di superare le carenze di cibo; nell'altra, i suoi prodotti contaminano i terreni e causano il cancro. Lo scorso anno la National Academy of Sciences ha effettuato quello che finora è forse l'esame più completo sugli OGM, e ha scoperto che nessuna delle due posizioni è corretta: il suo rapporto ha concluso che i prodotti agricoli GM sono sicuri da mangiare quanto quelli tradizionali, ma che «non esistono prove» che gli OGM abbiano accelerato un miglioramento delle rese.

Il rapporto indicava inoltre che il vantaggio principale di soia, cotone e mais geneticamente modificati era identificabile in «risultati economici favorevoli per i produttori che hanno adottato queste colture». Alle mie domande sui risultati non entusiasmanti del rapporto, un portavoce di Monsanto ha ammesso che l'azienda ha spostato il focus pubblicitario dall'idea di nutrire il mondo a quella di aiutare gli agricoltori a ottenere i migliori raccolti possibili con il minimo investimento. Il fatturato di Monsanto ha raggiunto i 13,5 miliardi di dollari nel 2016, di cui quasi 10 provengono dalle vendite di semi, per la maggior parte migliorati geneticamente. Il progresso degli ultimi vent'anni ha permesso agli agricoltori di risparmiare e ha riempito le casse dell'industria, ma il bisogno di aumentare la produzione alimentare resta urgente.

I raccolti di domani

I semi piantati oggi nei campi statunitensi non sono quelli dei nostri nonni. In genere contengono fino a 14 tratti geneticamente ingegnerizzati, aggiunti gli uni agli altri a formare quelli che sono chiamati *stack*. Spesso gli stack sono accompagnati da enormi quantità di altri elementi che potenzialmente favoriscono la

produttività, tra cui fertilizzanti, erbicidi e, più di recente, prodotti biologici come quelli microbici con cui BioAg Alliance riveste i semi. Ma c'è ancora molto che non sappiamo su che cosa costituisca una coltura salutare; ricercatori di università, enti governativi e grandi aziende lottano per essere i primi a scoprirlo.

Anche con i progressi tecnologici nel sequenziamento, finora gli scienziati hanno identificato solo l'1 per cento delle specie microbiche presenti nel terreno. La natura torbida della terra rende difficile visualizzare quello che accade nel sottosuolo, e i ricercatori sono dovuti ricorrere a studi finali distruttivi, in cui estraggono il terreno a palate ed esaminano in modo sommario i suoi costituenti microbici. È come se un gigante passasse le mani sulla Terra per raccogliere un campione del genere umano: può scoprire quali persone ci sono, ma non che cosa facevano o come interagivano prima che il loro mondo fosse messo a soqquadro.

Qualche anno fa un gruppo di ricerca in Scozia ha inventato un terreno artificiale trasparente che permette di spiare le comunità microbiche associate alle radici delle piante. La microbiologa di Chapel Hill Elizabeth Shank lo usa per studiare i segnali chimici dei microrganismi, che vanno da quelli letali (il 70 per cento degli antibiotici deriva da metaboliti che i microrganismi usano per farsi fuori a vicenda) a quelli produttivi (alcuni microrganismi li usano per comunicare che si aggregano per formare un biofilm con cui attaccarsi alla superficie delle radici). A novembre 2016, presentando il proprio lavoro a un simposio a Santa Fe, in New Mexico, Shank ha spiegato che, colorando i diversi metaboliti microbici con marcatori fluorescenti, può vedere i messaggi che passano tra le comunità quando reagiscono a eventi come una semina, un aumento delle temperature o un'invasione di patogeni.

L'innovazione di Shank potrebbe portare grandi guadagni, oppure no. Molti ricercatori, lei compresa, ormai concedono le proprie scoperte in licenza alle aziende o lanciano start-up. L'ecosistema commerciale è in ebollizione, con nuovi soggetti, collaborazioni e fusioni, come l'acquisizione di Monsanto da parte di Bayer a settembre 2016 per 66 miliardi di dollari. È entrato in campo anche il governo degli Stati Uniti: nel 2014 ha assegnato 200 milioni di dollari alla creazione della Foundation for Food and Agriculture Research (FFAR) per incoraggiare le collaborazioni tra università e industria. A luglio 2016 la FFAR ha riunito un gruppo di esperti per studiare il modo migliore per ottenere il massimo dei vantaggi dal fitobioma.

Kellye Eversole, direttrice esecutiva di Phytobiomes Alliance, afferma che sebbene università, governo e aziende possono condividere obiettivi simili, i loro metodi a volte sono incompatibili. Visti i loro obblighi con gli investitori, a volte le aziende hanno una mentalità a breve termine, legata ai profitti. «La mancanza di ricerca di base e di un sistema per il lungo termine possono essere dannosi», afferma Eversole. D'altra parte l'industria ha fondi che i professori di botanica possono solo sognare. Pochi giorni dopo l'evento della FFAR, Scott Schaecher di Monsanto ha tenuto una conferenza al convegno annuale dell'American Phytopathological Society, un raduno di oltre 1500 fitopatologi, e quando ha mostrato la mappa degli esperimenti nei campi di BioAg Alliance, la fitopatologa Linda Kinkel dell'Università del Minnesota è quasi caduta dalla sedia. «Se davvero raccolgono i dati di 500.000 microbiomi di terreno, ne hanno di più di tutti i nostri messi insieme». E aggiunge, preoccupata: «Quanta scienza c'è che non vedremo mai?».

Sfruttare il fitobioma per migliorare i raccolti richiederà un'integrazione delle informazioni da fonti e discipline diverse, ma molte parti in causa non sono collaborative. Gli agricoltori esitano a dare accesso ai dati dei propri campi per timori di privacy. BioAg Alliance ogni tanto concede informazioni ai collaboratori accademici, ma secondo Schaecher non può condividere tutti i dati perché Monsanto e Novozymes devono «proteggere il proprio vantaggio competitivo». Quest'anno BioAg ha lanciato il primo prodotto, un rivestimento microbico per semi basato su un fungo che si trova nel terreno dei campi di mais: ha aumentato la produttività in media di 190 chilogrammi per ettaro in test sul campo e, secondo le stime, si potrebbe usare per aumentare la produttività di 36 milioni di ettari di terreni agricoli in tutto il mondo.

È un inizio, ma siamo ancora lontani dal rispondere al fabbisogno di un pianeta sempre più affollato. Anche se ci fosse una maggiore condivisione di dati da parte degli scienziati, è improbabile che il problema della fame nel mondo si risolva solo con i progressi delle biotecnologie, perché riguarda l'approvvigionamento, ma anche sprechi alimentari, problemi di distribuzione, guerre, lotte politiche, disuguaglianze di reddito e cambiamento climatico. Fred Gould, entomologo della North Carolina State University che ha diretto l'analisi della National Academy of Sciences sugli OGM, avverte che, se anche gli scienziati riuscissero a raddoppiare la produzione alimentare, potrebbe comunque non essere la cosa giusta da fare, se si lascia il suolo devastato e incapace di sostenere coltivazioni future. Avverte anche che le soluzioni devono funzionare sul campo: «Possiamo avere molte conoscenze, ma sono collegate all'ambiente in modo così stretto che sarà necessario manipolare il fitobioma di ciascun terreno separatamente. Quando si arriva al dunque, alcune di queste idee sono difficili da mettere in pratica».

Anche se gli scienziati di aziende, università ed enti governativi condividessero di più i propri dati, è improbabile che il problema della fame nel mondo si risolva solo con i progressi delle biotecnologie. Sarà necessaria anche una volontà politica

Probabilmente la modifica del fitobioma sarà solo una parte della prossima rivoluzione agricola. Serviranno anche volontà politica e tanta fortuna. Del resto, al 2050 mancano solo 32 cicli produttivi annuali. ■

PER APPROFONDIRE

How Microbes Can Help Feed the World, American Academy of Microbiology Colloquium. Reid A. e Greene S.E., agosto 2013. **www.asm.org/images/stories/documents/FeedTheWorld.pdf.**

Herbivore Exploits Orally Secreted Bacteria to Suppress Plant Defenses. Chung S.H. e altri, in «Proceedings of the National Academy of Sciences», Vol. 110, n. 39, pp. 15728-15733, 24 settembre 2013.

Phytobiomes: A Roadmap for Research and Translation. American Phytopathological Society, 2016. **www.phytobiomes.org/Roadmap/Pages/default.aspx.**

Microbes Added to Seeds Could Boost Crop Production. Broadfoot M., in Scientificamerican.com, pubblicato on line il 6 gennaio 2016. **www.scientificamerican.com/article/microbes-added-to-seeds-could-boost-crop-production.**

I cibi OGM sono il male? Freedman D.H., in «Le Scienze» n. 543, novembre 2013.

Nostro cugino

di Kate Wong

La somma delle parti.
La ricostruzione dei pezzi del cranio di Neo rivela il volto di *Homo naledi*. Per un approfondimento sulle nuove scoperte si può visitare la pagina www.ScientificAmerican.com/neo.

Neo

Uno scheletro notevolmente completo, e finalmente una datazione, per il misterioso *Homo naledi*

Kate Wong è *senior editor* di «Scientific American» per ecologia ed evoluzione.

John Hawks/Wits University

Lee Berger e colleghi, dell'Università del Witwatersrand, a Johannesburg, hanno fatto parecchio rumore nel 2015, presentando oltre 1500 fossili umani provenienti da una quindicina di individui – maschi e femmine, giovani e vecchi – scoperti in Sudafrica. Era uno dei più ricchi assemblaggi di fossili umani mai rinvenuti e veniva da una camera profonda di un sistema di caverne sotterranee nei pressi di Johannesburg chiamato Rising Star. Secondo le deduzioni del gruppo, le ossa appartenevano a una nuova specie, *Homo naledi*, dotata di una curiosa miscela di tratti primitivi, come il cervello minuscolo, e caratteri moderni, come le lunghe gambe. Gli scopritori hanno stabilito che sapevano arrampicarsi sugli alberi ma anche camminare per lunghe distanze, e ipotizzato che fossero stati loro a collocare i propri morti in quella camera, totalmente buia e difficile da raggiungere.

Ma a dispetto di tutte le informazioni che ne avevano ricavato, forse la scoperta era nota soprattutto per ciò che i ricercatori non erano riusciti ad accertare: l'età delle ossa.

Adesso anche questo tassello tanto atteso va finalmente a posto. Nei lavori pubblicati on line il 9 maggio su «eLife», il gruppo riferisce di aver datato i resti di *H. naledi*: la loro età risulta compresa tra 236.000 e 335.000 anni: sorprendentemente pochi per una specie dal cervello così piccolo. I ricercatori hanno annunciato inoltre di aver scoperto ancora altri fossili di *H. naledi* in una seconda camera del sistema Rising Star, fra cui lo scheletro di un maschio adulto, che hanno soprannominato Neo, cioè «dono», nella lingua sesotho parlata nella zona.

I reperti sollevano affascinanti interrogativi sull'origine e l'evoluzione del genere *Homo*, cui apparteniamo. Benché le ossa siano così recenti, gli scienziati del gruppo continuano a sostenere che i tratti primitivi di *H. naledi* lo ricollegano a membri assai più antichi della famiglia umana; e sostengono che questa specie potrebbe anche essere stata fra gli antenati diretti di *Homo sapiens*.

Berger e collaboratori notano poi che la nuova datazione di *H. naledi* indica che ha vissuto in tempi in cui i nostri antenati fabbricavano i raffinati strumenti in pietra della tradizione mesolitica. Molti dei siti in cui gli archeologi hanno trovato questi attrezzi non contengono fossili umani, ma gli esperti hanno sempre dato per scontato che fossero stati prodotti da esseri umani dal cervello voluminoso. Se però a quei tempi era in giro anche *H. naledi*, come suggeriscono gli autori, non si può escludere che li abbia prodotti questa specie. In tal caso, gli scienziati dovranno ripensare la consolidata nozione che la complessità del comportamento dipende dalle dimensioni del cervello. Un paleoantropologo estraneo a questa ricerca, Mark Collard, della Simon Fraser University, nella British Columbia, pensa che ci sia un buon motivo per farlo: «La storia della paleoantropologia è piena di assunti profondamente radicati che poi sono stati rovesciati da nuove scoperte». ■

PSICOLOGIA

DIALOGHI CON SE STESSI

Gli studi delle conversazioni che abbiamo con noi stessi aprono una finestra sui meccanismi nascosti della mente

di Charles Fernyhough

IN BREVE

Buona parte di noi parla a se stessa nella mente, un fenomeno che gli psicologi chiamano linguaggio interiore.
Questo dialogo con noi stessi ci aiuta, fra altre importanti funzioni, a regolare le emozioni e a essere creativi, finora però era sfuggito a ogni indagine.
In anni recenti gli psicologi hanno fatto significativi passi avanti nell'analisi del linguaggio interiore, anche grazie a studi basati su neuroimmagini con cui osservare il cervello in attività.
I loro risultati rivelano alcune basi neurali di queste conversazioni private e fanno luce su alcuni misteri di lunga data della mente.

Illustrazione di Daniel Stolle

Charles Fernyhough è professore di psicologia all'Università di Durham, in Inghilterra. Studia lo sviluppo del bambino, la memoria e le allucinazioni. Ha scritto libri di narrativa e di saggistica. Il suo ultimo saggio, *The Voices Within* (Basic Books, 2016), riguarda il dialogo interiore.

Il suono della sveglia mi aveva fatto svegliare presto. Mi trovavo in una stanza d'albergo a Londra, vicino alla sede centrale della BBC. Non avevo dormito bene. Quando mi ero guardato allo specchio del bagno, avevo visto un volto pallido e un po' atterrito. Avevo tutte le ragioni per sentirmi ansioso: di lì a un'ora avrei dovuto parlare in diretta a un pubblico di milioni di persone a *Start the Week*, un *talk-show* sul principale canale radio della BBC. Mentre fissavo lo specchio ero consapevole di parlare in silenzio, nella mia testa. Erano parole di rassicurazione rivolte a me stesso. «Rilassati», dicevo. «Non è la prima volta che vai a *Start the Week*». Avevo come l'impressione di parlare a me stesso, ma stavo anche ascoltando qualcosa dentro di me, l'ombra familiare di una voce.

Questo è il racconto di un'esperienza quotidiana: pensieri, immagini e sensazioni che percorrono la vostra mente mentre state scendendo nella metropolitana, tagliando le cipolle in cucina o aspettando di entrare in una riunione importante. Alla domanda, le persone rispondono spesso che le loro vite interiori contengono tante parole. Gli psicologi usano l'espressione «linguaggio interiore» per questo fenomeno in cui parliamo a noi stessi, in silenzio, nella mente. Ha un parente stretto, il «linguaggio privato», in cui le persone parlano con se stesse in modo udibile. Se, per esempio, pronunciate dentro di voi parole come «ricordati di prendere un po' di caffè» o «attieniti al programma» senza produrre alcun suono, allora state usando il linguaggio interiore; se dite a voi stessi qualcosa di simile, ma a voce alta, è linguaggio privato.

Le due forme di linguaggio sembrano avere finalità diverse, come pianificare e supervisionare il nostro comportamento, regolare le nostre emozioni e stimolare la creatività. Negli adulti il linguaggio interiore sembra più comune della sua forma privata e quindi – cosa molto interessante per gli psicologi – è la forma che probabilmente svolge il ruolo più importante nel nostro pensiero. Ed è anche quella decisamente più difficile da studiare. Negli anni novanta, quando ero agli inizi nel mio lavoro di ricerca, quasi non esisteva letteratura scientifica sull'argomento. Negli ultimi vent'anni, tuttavia, la situazione è decisamente mutata, sia perché i ricercatori hanno sviluppato nuove tecniche sperimentali per studiare il linguaggio interiore, sia perché oggi abbiamo un'idea più completa di come funziona, quale forma assume e come può fornire un vantaggio, oppure ostacolare, una persona che pensa. In effetti, stiamo cominciando a capire che il linguaggio interiore chiarisce alcune grandi questioni che riguardano la mente e il cervello.

Conversare con se stessi

Henry, un bambino di tre anni, è disteso su un tappetino da gioco con un trenino giocattolo in ciascuna mano e descrive con entusiasmo la città inventata che sta creando. «Prima le macchine. Poi un treno *grande*», dice fra sé. Visitate una cameretta o un asilo, ovunque nel mondo, e vedrete (e sentirete) qualcosa di simile. Una classe di bambini che pensano fra sé ad alta voce può diventare un posto rumoroso. Ma questo fenomeno naturale del linguaggio privato dei bambini offre indizi importanti sulla sede d'origine delle parole nella nostra mente.

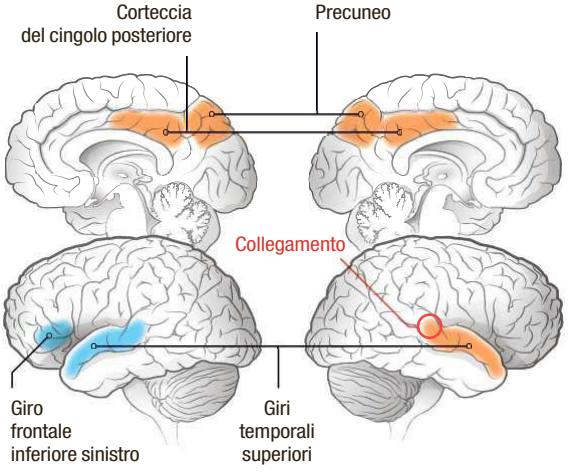
Gli studiosi hanno riflettuto a lungo sul linguaggio privato dei bambini in tenera età. Negli anni venti, lo psicologo dello sviluppo svizzero Jean Piaget aveva ipotizzato che questo tipo di dialogo con se stessi riflettesse l'incapacità dei bimbi di assumere la prospettiva in terza persona e di adattare il linguaggio agli ascoltatori. Secondo questa teoria, il linguaggio privato emergeva da un'incapacità di comunicare con gli altri. Per questa ragione si pensava che svanisse quando i bambini crescevano e diventavano più abili nel considerare la prospettiva degli ascoltatori.

Negli anni trenta lo psicologo russo Lev Semyonovich Vygotsky propose una spiegazione alternativa del linguaggio privato: i

Illustrazione di Tarmi Tolpa

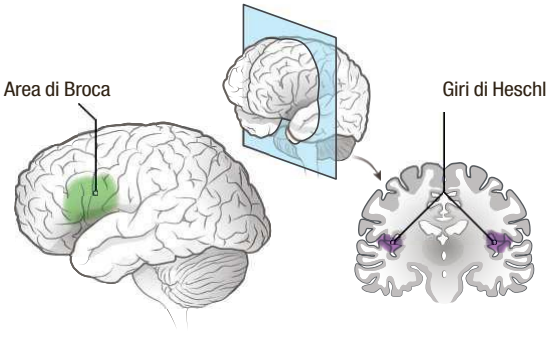
Origini del linguaggio interiore

Le neuroimmagini del cervello di persone impegnate nel dialogo con se stesse rivelano affascinanti differenze nelle basi neurali dei dialoghi interiori rispetto a quelle dei monologhi. Tuttavia l'interpretazione di questi studi basati su neuroimmagini richiede cautela perché i modi in cui sono stati progettati gli studi possono influenzare i risultati: le regioni cerebrali attivate durante il linguaggio interiore generato spontaneamente sono diverse rispetto a quelle attivate quando il linguaggio interiore è prodotto a comando.



Monologo e dialogo

Gli studi con la risonanza magnetica funzionale (fMRI) indicano che il linguaggio interiore dei monologhi recluta il sistema tradizionale del linguaggio, che si attiva durante qualsiasi tipo di linguaggio (*in azzurro*). Dal canto suo, il linguaggio interiore nei dialoghi usa in aggiunta diverse altre regioni neurali (*in arancione*). Curiosamente le aree cerebrali che appaiono coinvolte in modo specifico nel dialogo interiore si sovrappongono a regioni che sono state collegate al pensiero su altre menti (*in rosso*).



Meccanico o spontaneo

In un altro studio con la fMRI alcuni partecipanti, ai quali era stato chiesto di pronunciare fra sé alcune parole in particolare, hanno attivato l'area di Broca, una parte del sistema del linguaggio classico (*in verde*). Viceversa, il linguaggio interiore spontaneo ha attivato regioni più posteriori nei lobi temporali (*in viola*).

Fonti: *The Brain's Conversation with Itself: Neural Substrates of Dialogic Inner Speech*, di Ben Alderson-Day e altri, in «Social Cognitive and Affective Neuroscience», Vol. 11, n. 1, gennaio 2016; *(monologo vs. dialogo); Exploring the Ecological Validity of Thinking on Demand: Neural Correlates of Elicited vs. Spontaneously Occurring Inner Speech*, di Russell T. Hurlburt e altri, in «PLoS ONE», Vol. 11, n. 2, articolo n. e0147932, 4 febbraio 2016 *(meccanico vs. spontaneo)*.

bambini riadattano deliberatamente parole che hanno usato con successo in precedenza nelle interazioni sociali con altri individui. Invece di controllare il comportamento di altri, i piccoli farebbero pratica nell'uso del linguaggio per avere un controllo su se stessi. Le ricerche effettuate nei decenni successivi hanno rafforzato la teoria di Vygotsky sullo sviluppo e l'acquisizione delle funzioni del linguaggio interiore.

Quando, studente in psicologia dello sviluppo, scoprii i suoi scritti, ricordo che mi colpì la semplicità della sua teoria. Pensavo che la teoria dello sviluppo del pensiero verbale dovesse essere più complicata. Ma sebbene la teoria di Vygotsky fosse in sé semplice, le sue implicazioni erano piuttosto complesse. Vygotsky suggeriva che il dialogo silenzioso con noi stessi da adulti fosse una versione interiorizzata delle conversazioni che abbiamo con gli altri mentre ci sviluppiamo come bambini. Quasi un secolo dopo che Vygotsky aveva esposto queste sue idee, io e altri ricercatori sul linguaggio interiore stiamo appena iniziando a chiarire qual è la loro importanza per capire come le parole operano nel nostro pensiero.

Una delle implicazioni più importanti della teoria di Vygotsky è che il linguaggio interiore dovrebbe avere la stessa struttura della conversazione a voce alta, cioè la caratteristica di un dialogo tra punti di vista differenti. Questo concetto del pensiero come dialogo mentale non è nuovo, risale almeno al filosofo Platone, ma mi sono agganciato alla sua potenzialità di riformulare alcuni misteri profondi del pensiero umano. Uno dei quali riguarda il controllo: come fa un sistema intelligente a concepire, e applicare, nuove teorie su come agire? Un robot può diventare molto intelligente nel reagire agli eventi intorno a lui, ma che cosa gli fa concepire l'idea di fare qualcosa da solo? Se bisogna dire al sistema che cosa fare, allora gli manca una delle essenze dell'intelligenza.

La cosa che mi incuriosiva del dialogo è che, per sua stessa natura, si autoregola. Quando conversate con qualcuno non c'è una terza persona in piedi che, agitando la bacchetta da direttore, vi indica in quale direzione dovrebbe poi procedere la conversazione. Voi e il vostro partner di conversazione vi regolate a vicenda tramite i normali processi di domanda, discussione, risposta, consenso e così via. Interpretare il dialogo con se stessi in questi termini sembrerebbe offrire la prospettiva di spiegare come il pensiero può essere indeterminato – non sempre diretto a un particolare obiettivo – e intrinsecamente elastico.

Tuttavia, per dialogare dovete riuscire a rappresentare qualcosa del punto di vista della persona con cui conversate. Per inciso, è stata proprio la mancanza di questo tipo di adozione di prospettiva che spiegava, per Piaget, il linguaggio privato dei bambini piccoli. Spesso non sapete in anticipo che cosa sta pensando l'altra persona, ma una volta che riuscite a capirlo, dovete saper tenere a mente e aggiornare quella rappresentazione del suo punto di vista mentre la conversazione si svolge. Oggi gli scienziati sanno molte cose sulle basi neurali di questa adozione di prospettiva, e il merito è in parte degli studi con la risonanza magnetica funzionale (fMRI) e di altre tecniche di visualizzazione medica, che possono rivelare quali regioni cerebrali svolgono un certo compito.

Forti di queste conoscenze, con i miei collaboratori abbiamo verificato una nuova teoria dello svolgimento dei dialoghi mentali, basata sull'ipotesi per cui questi dialoghi reclutano le stesse parti del cervello usate nell'adozione di prospettiva. In un esperimento con la fMRI condotto da Ben Alderson-Day, dell'Università di Durham, nel Regno Unito, i partecipanti producevano due forme di linguaggio interiore mentre erano distesi in uno scanner per la ri-

sonanza cerebrale. Abbiamo chiesto ai partecipanti di generare un linguaggio interiore che avesse una struttura monologica. In altre parole, non implicava uno scambio di conversazione tra punti di vista differenti. Abbiamo anche chiesto loro di svolgere un dialogo interiore. In ciascun caso abbiamo presentato un particolare scenario come tema del linguaggio interiore, per esempio una visita alla scuola d'infanzia. Nella situazione del monologo, i soggetti tenevano magari un discorso agli studenti, in quella del dialogo parlavano con il preside di allora.

Avevamo previsto che entrambi i tipi di linguaggio interiore avrebbero reclutato i sistemi del linguaggio tradizionali che si attivano quando si chiede ai soggetti di produrre qualsiasi forma di linguaggio: più precisamente, aree al confine tra il lobo frontale e il lobo temporale nell'emisfero sinistro del cervello e un'area situata più posteriormente nella parte del cervello conosciuta come giro (o circonvoluzione) temporale superiore. Pensavamo però che il dialogo interiore fosse speciale nell'attivare in aggiunta parti del cervello che sappiamo coinvolte quando riflettiamo su altre menti. Queste regioni cerebrali sono alla base del nostro cosiddetto sistema di cognizione sociale, che funziona per aiutarci a rappresentare pensieri, convinzioni e desideri altrui.

I risultati hanno confermato le nostre previsioni. Quando i soggetti erano impegnati nel dialogo interiore, il loro sistema del linguaggio sembrava operare di concerto con una parte del loro sistema di cognizione sociale, localizzato nell'emisfero destro, prossimo al punto d'incontro tra il lobo temporale e quello parietale, uno schema di attività cerebrale che i soggetti non manifestavano quando generavano monologhi silenziosi. Questi risultati, sebbene siano da replicare, sono le prime prove di una collaborazione – che abbraccia i due emisferi cerebrali – tra due sistemi considerati di solito differenti per funzione. Questo collegamento neurale di linguaggio e cognizione sociale sembra sostenere le intuizioni di Vygotsky secondo cui, quando parliamo con noi stessi, in effetti stiamo svolgendo una conversazione.

Colto sul fatto

Ci sono miriadi di ragioni per essere cauti nell'interpretare i risultati ricavati dalle neuroimmagini e, in questo caso, per ribaltare quanto già si sapeva sulla neuroscienza del linguaggio interiore. Buona parte degli studi passati si limitava a chiedere ai partecipanti di ripetere a se stessi alcune frasi nella mente, in silenzio, come monologo e non come conversazione: il tipo di linguaggio interiore che vi può capitare di produrre girovagando per un supermercato mentre provate a ricordare le ultime voci della vostra lista. È utile quando il momento lo richiede, ma è ben diverso dai dialoghi interiori creativi e flessibili che emergono quando immaginiamo noi stessi partecipare a uno scambio sociale. Il nostro gruppo di ricerca ha messo sotto i riflettori le proprietà conversazionali del linguaggio interiore. Tuttavia stavamo ancora chiedendo ai nostri volontari di fare qualcosa a dir poco innaturale: parlare con se stessi a comando invece di aspettare che il linguaggio interiore emergesse spontaneamente. Il problema è che i neuroscienziati cognitivi devono avere tutto sotto controllo per cogliere il vero senso dei risultati di un esperimento. Aspettare che il linguaggio interiore accada spontaneamente sembra stridere con l'idea di metodo sperimentale rigoroso.

A noi serve un modo per cogliere il linguaggio interiore mentre accade. Di recente il nostro gruppo ha fatto un passo in quella direzione usando un metodo elaborato per raccogliere dalle persone descrizioni dell'esperienza interiore, conosciuto come campionamento descrittivo dell'esperienza, o DES (*descriptive experience sampling*). Questo metodo allena i partecipanti a riferire gli istanti di esperienza interiore quando sono sollecitati da un segnale acustico. Il processo induce i soggetti a focalizzarsi su qualsiasi cosa stiano pensando, provando, ascoltando e così via, fino all'istante prima che il bip del segnale svanisca, e ad annotare quelle esperienze mentre accadono. Il giorno successivo i volontari sono interrogati molto a fondo su ciascun momento di esperienza colto dal bip. Così i ricercatori possono descrivere se era caratterizzato da linguaggio interiore, da consapevolezza sensoriale o da uno tra molti altri fenomeni comuni.

Il linguaggio interiore e quello privato sono spesso abbreviati rispetto alle espressioni rivolte a una terza persona, come aveva già capito il romanziere Vladimir Nabokov

Io e i miei colleghi abbiamo condotto il primo studio in assoluto che unisce questo potente metodo e la fMRI. Abbiamo eseguito il tradizionale esperimento del linguaggio interiore, chiedendo ai volontari di pronunciare dentro di sé in silenzio parole specifiche mentre erano distesi nello scanner. Abbiamo anche usato il DES per cogliere i momenti di esperienza mentre accadevano spontaneamente. Abbiamo scelto i bip nei quali – dalle interviste nel DES – eravamo piuttosto sicuri che si fosse manifestato il linguaggio interiore, e abbiamo confrontato le attivazioni del cervello con quelle che avevamo ottenuto nell'esercizio standard.

Le differenze erano rilevanti: se da un lato il metodo classico della «ripetizione meccanica» attivava l'area di Broca (una parte del cervello spesso implicata nella produzione del linguaggio interiore ed esteriore), dall'altro il linguaggio interiore spontaneo attivava in modo più marcato una zona del lobo temporale più posteriore, il giro (o circonvoluzione) di Heschl. In termini di schemi di attivazione del cervello, il linguaggio interiore spontaneo si discostava dal linguaggio generato su richiesta.

Questi risultati hanno vaste implicazioni per come procedere nell'indagine dell'esperienza interiore nelle neuroscienze cognitive. Sollevano domande impegnative su come i ricercatori affrontano lo studio del linguaggio interiore e su che cosa possiamo ipotizzare riguardo a qualsiasi tipo di esperienza mentale che potremmo pensare sia generabile a richiesta. Evidenziano il bisogno di quella che mi piace definire neuroscienza lenta: sfruttare il potere di tecniche neuroscientifiche per descrizioni molto accurate dell'esperienza umana.

Ci sono altre ragioni per avere cura di descrivere il linguaggio interiore in tutte le sue varietà. Nella teoria di Vygotsky, dialogo e monologo non sono le uniche variabili del dialogo interiore. Una caratteristica importante di questo scenario è la teoria secondo cui, quando il linguaggio è interiorizzato per formare un linguaggio privato e poi interiore, la sua forma cambia. Vygotsky immaginò diversi modi in cui questo potrebbe accadere, fra i quali tipi differenti di abbreviazione o di riassunto. Nei miei pensieri ansiosi in albergo a Londra avevo capito di essermi detto una frase intera: «Non è la prima volta che vai a *Start the Week*». In altri momen-

ti il linguaggio che rivolgo a me stesso è più conciso. Se sento un suono continuo in cucina mentre sono ai fornelli, potrei dire dentro di me qualcosa del tipo «sta suonando il timer del forno», ma è più verosimile che mi limiterò a dire «il timer». Vygotsky osservò che il linguaggio interiore e quello privato sono spesso abbreviati rispetto alle espressioni rivolte a una terza persona. Di solito, nel dialogo con noi stessi non dobbiamo mettere tutto per esteso, anche perché l'espressione è rivolta al nostro io, quindi non dobbiamo pronunciare ogni dettaglio. Il grande romanziere russo naturalizzato statunitense Vladimir Nabokov aveva capito che i nostri pensieri possono avere una forma compressa se confrontati con quello che potremmo dire a voce. «Noi non pensiamo per parole ma per ombre di parole», scrisse negli appunti per il romanzo *Fuoco pallido*, come disse in un'intervista del 1964.

La cosa a dir poco strana è che fino a poco tempo fa nessuno aveva esaminato questa caratteristica del linguaggio interiore. Io e Simon McCarthy-Jones, oggi al Trinity College di Dublino, abbiamo preparato un questionario *on line* con cui abbiamo interrogato i volontari su differenti caratteristiche del linguaggio interiore. Abbiamo anche usato un'app per smartphone che registrava i dati mentre i volontari trascorrevano le loro giornate. I risultati del nostro primo studio, pubblicato nel 2011, hanno rivelato quattro caratteristiche principali del linguaggio interiore: natura dialogica, tendenza a essere conciso, la misura in cui può includere voci di altre persone, e il suo ruolo nel valutare o nel motivare il nostro comportamento. Solo una minoranza di persone ha indicato che il loro linguaggio interiore tende a essere conciso. Ma questa caratteristica è abbastanza comune da giustificare ulteriori indagini.

Questa ricerca basata sul questionario conferma soprattutto la teoria per cui il linguaggio interiore non è unico. Sembra invece manifestarsi in forme differenti che potrebbero essere adattate a funzioni differenti, e che forse hanno anche basi neurali differenti. Una sfida futura sarà capire se il cervello tratta il linguaggio interiore conciso diversamente dalla sua forma espansa. Tutto questo richiederà un modo per evocare sperimentalmente il linguaggio interiore conciso durante le scansioni cerebrali, oppure ulteriori sviluppi per coglierlo mentre avviene in modo spontaneo. Il linguaggio interiore resta un oggetto di studio sfuggente.

Una via per la creatività

Lo studio del linguaggio interiore ha fatto grandi progressi da quando, negli anni novanta, ho iniziato a rifletterci da studente. Un aspetto della vita mentale considerato inviolabile dalla scienza ha prodotto nuovi metodi sperimentali e tecniche neuroscientifiche. Come spesso accade, questo aspetto intimo della coscienza può fare luce su questioni importanti della mente umana.

Per cominciare, il linguaggio interiore può offrire indizi sull'origine della creatività umana. Una volta in possesso della struttura delle conversazioni interiori, possiamo usarla nei modi più vari: dalla discussione con noi stessi fino alla conversazione con un'entità assente. Poiché abbiamo interiorizzato dialoghi con altre persone, conserviamo un «posto vacante» per le prospettive di altre entità: che siano o meno presenti, ancora vive oppure mai esistite. I miei dialoghi con Dio, con un parente defunto o con un amico immaginario possono avere una ricchezza creativa analoga a quella che ho con me stesso. Porre domande a se stessi e poi rispondervi potrebbe essere un elemento cruciale di uno strumento per trasportare i nostri pensieri in nuovi territori.

Un'altra esperienza comune che si collega al dialogo con se stessi è tra le più familiari e private. Nel momento in cui aprite un libro, il vostro linguaggio interiore è catturato nei modi più curiosi. I neuroscienziati hanno dimostrato che leggere le parole di un personaggio letterario attiva le parti del cervello che usiamo anche per elaborare le voci altrui. Di recente, con un sondaggio on line, il nostro gruppo ha posto alcune domande a un ampio campione di lettori attenti sulle «voci» che sentivano leggendo romanzi. Quasi un intervistato su sette diceva che le voci dei personaggi letterari parlavano vividamente nella loro mente, come se nella stanza ci fosse un'altra persona a pronunciare le parole.

Alcuni partecipanti ci hanno fornito più dettagli sulla loro esperienza di voci fittizie. Usando gli strumenti impiegati negli studi letterari per analizzare le storie, abbiamo esaminato le loro descrizioni prive di finale, per altri indizi sul potere della letteratura di colonizzare i nostri pensieri. Per alcuni intervistati, le voci dei personaggi letterari hanno risuonato addirittura dopo che i libri erano stati posati. Alcuni avevano addirittura adottato nella vita quotidiana la personalità di personaggi di finzione: è capitato che guardassero il mondo con gli occhi della signora Dalloway (il personaggio dell'omonimo romanzo di Virginia Woolf) durante una normale visita a Starbucks. Marco Bernini, dell'Università di Durham, ha definito questo fenomeno «attraversamento esperienziale». Questi risultati ci offrono importanti indizi di come la nostra mente potrebbe rappresentare le voci e i personaggi degli esseri sociali con cui condividiamo il nostro mondo.

La nuova scienza del linguaggio interiore ci dice che non è un processo solitario. Molta forza del dialogo con se stessi deriva da come questo linguaggio orchestra uno scambio tra punti di vista differenti. Con i miei colleghi abbiamo osservato una collaborazione tra il sistema del linguaggio nell'emisfero sinistro e le reti della cognizione sociale in quello destro. Allo stesso modo la rete del linguaggio interiore deve sapersi «connettere» con altri sistemi neurali quando la situazione lo richiede: quando abbiamo pensieri verbali sul passato e sul futuro, quando usiamo parole per parlare a noi stessi durante compiti impegnativi o quando la nostra mente si limita a vagare senza un particolare obiettivo. Se i ricercatori prenderanno la scienza per il verso giusto, il pensiero verbale potrà chiarire tutti questi aspetti della nostra attività cognitiva.

Forse il linguaggio interiore ha ricevuto poca attenzione scientifica perché è comune. Ma la prossima volta che vi troverete a incoraggiare voi stessi dinanzi a una sfida, a parlare tra voi per risolvere un problema, a rimproverarvi dopo un errore o semplicemente a pianificare la vostra serata in un confidenziale mormorio a voce alta, potreste avere voglia di riflettere sulla meraviglia privata, intima, dell'uso diretto a voi stessi delle parole. Nella vita quotidiana, come in laboratorio, le voci del linguaggio interiore hanno molte cose da dirci. ■

PER APPROFONDIRE

The Varieties of Inner Speech: Links between Quality of Inner Speech and Psychopathological Variables in a Sample of Young Adults. McCarthy-Jones S. e Fernyhough C., in «Consciousness and Cognition», Vol. 20, n. 4, pp. 1586-1593, dicembre 2011.

Inner Experience in the Scanner: Can High Fidelity Apprehension of Inner Experience Be Integrated with fMRI? Kühn S. e altri, in «Frontiers in Psychology», Vol. 5, articolo n. 1393, 9 dicembre 2014.

The Brain's Conversation with Itself: Neural Substrates of Dialogic Inner Speech. Alderson-Day B. e altri, in «Social Cognitive and Affective Neuroscience», Vol. 11, n. 1, pp. 110-120, gennaio 2016.

Uncharted Features and Dynamics of Reading: Voices, Characters, and Crossing of Experiences. Alderson-Day B. e altri, in «Consciousness and Cognition», Vol. 49, pp. 98-109, marzo 2017.

Alcuni pescatori estraggono corvine dal mare di Cortez increspato di onde. La pesca è stata accusata dell'eliminazione delle vaquita, ma nell'elenco dei possibili colpevoli ci sono anche il crimine organizzato e i funzionari governativi corrotti.

CONSERVAZIONE AMBIENTALE

Requiem per la vaquita

Che cosa insegna la scomparsa di una piccola focena messicana sulle estinzioni nel XXI secolo

di Erik Vance - fotografie di Christian Rodriguez

Erik Vance è un giornalista freelance di Città del Messico che si occupa di ambiente e neuroscienze.

Le vaquita, o focene del golfo della California, sono grandi più o meno come i totoaba, una specie pescata di frodo, quindi spesso restano impigliate nelle stesse reti.

Sulla parte settentrionale del mare di Cortez si sta facendo notte, ed è tutto innaturalmente immobile: sterne e pellicani si sono già riparati per la notte, i delfini non solcano più le acque dove prima si trovavano a centinaia e i leoni marini si sono trascinati all'asciutto per l'imbrunire. Le acque color cioccolato, di solito agitate, sono lisce come l'olio.

Il tramonto è il momento migliore per trovarsi nella parte settentrionale del Golfo della California, come è anche noto questo mare incuneato accanto al deserto del Messico, vicino al confine con gli Stati Uniti. Ammirando il panorama, quasi dimentico di essere sul ponte di una nave che batte una bandiera pirata a domandarmi se stiamo per essere abbordati da pescatori inferociti e armati. Nick Allen, aiuto nostromo di questo vascello da 55 metri gestito dalla Sea Shepherd Conservation Society, sta tirando su una lenza illegale di 1200 metri. Finora abbiamo trovato un paio di anguille morte e un esemplare di pesce martello, una specie a rischio. Finalmente appare quello che stavamo cercando: «Un totoaba!», grida Allen. «Lì, lì!».

Il pesce, ancora vivo, è lungo circa 1,2 metri, ha la forma di un dirigibile e vale diverse migliaia di dollari. Rinvigoriti, gli attivisti della Sea Shepherd si preparano a liberarlo. L'equipaggio, una ventina di persone, ha passato gli ultimi quattro mesi eliminando le reti che contaminano la parte settentrionale del golfo: hanno estratto più di 100 cavi abbandonati e decine di cadaveri di totoaba, leoni marini e altre specie protette. Quasi ogni notte il loro radar segnala pescatori che calano nuove reti usando scafi che seminano facilmente i battelli della guardia costiera locale. Di giorno i membri della Sea Shepherd lanciano droni che osservano pescatori di frodo alla ricerca di zone in cui gettare reti illegali, praticamente sotto il naso delle autorità.

In realtà gli ambientalisti non sono interessati ai totoaba: sono lì per una piccola focena la cui estinzione sembra praticamente inevitabile. Il nome scientifico è *Phocoena sinus,* e in italiano è nota come focena del golfo della California, ma i locali la chiamano *vaquita*, «piccola mucca». Le vaquita rimangono spesso impigliate nelle reti destinate ai totoaba, e lì muoiono. «Ehi! Se ne va! Va via!», urla qualcuno mentre il grosso pesce si libera e scompare nelle acque torbide appena viene reciso l'amo. «Oh sì, questo era decisamente un esemplare nel pieno delle forze».

È raro che gli equipaggi della Sea Shepherd siano accolti volentieri come soluzione ai problema di pesca. Famosi per gli inseguimenti delle baleniere giapponesi nell'Oceano Artico, sono un rimedio estremo. Odiati dalle comunità pescherecce di tutto il mondo, di solito il loro arrivo significa che ogni sforzo diplomatico è fallito miseramente. E in nessun luogo questo è più vero più che nella parte settentrionale del golfo della California.

Il mare di Cortez è uno dei più grandiosi ecosistemi mondiali: ci vivono più di 1000 specie ittiche, il 10 per cento delle quali non esiste altrove. Metà del pescato raccolto dalla pesca commerciale messicana proviene da questo mare, e qui animalisti e pescatori sono in conflitto perenne. Negli ultimi trent'anni si sono scontrati sulle vaquita in un ciclo continuo di accuse, critiche, corruzione e a volte violenze. Appena un giorno prima, nel tentativo di fermare le attività illegali, le autorità federali avevano annunciato che la stagione di pesca era cancellata per un altro anno, e in tutta risposta, in una città pochi chilometri a est, chiamata El Golfo de Santa Clara, i pescatori erano insorti incendiando dieci camion governativi e diverse barche, e malmenando gli agenti della guardia ittica.

A complicare le cose, i trafficanti di droga sono complici dei

IN BREVE

Nell'intero mare di Cortez rimangono solo 30 focene del golfo, dette anche *vaquita*. Per anni sono morte dopo essere state catturate dalle reti dei pescatori, molte delle quali illegali, usate per pescare pesci chiamati totoaba (*Totoaba macdonaldi*).

La mancata regolamentazione della pesca, una lotta tra fazioni scientifiche, organizzazioni criminali che vendono le vesciche natatorie dei totoaba al mercato nero e l'incapacità delle autorità messicane di collaborare con i pescatori hanno condannato le vaquita.

Decine di altre specie, dai leopardi delle nevi agli elefanti, si trovano a dover affrontare gravi minacce. Non possono essere salvate dai biologi. Devono pensarci le autorità governative, a cui spetta il compito di migliorare le economie locali.

Flip Nicklin/Getty Images

Militari messicani fronteggiano un pescatore che sospettano di aver gettato illegalmente una rete dalla costa di Santa Clara.

pescatori di frodo per controllare il passaggio di totoaba attraverso la frontiera statunitense. Minacce di morte a funzionari pubblici e ambientalisti avvengono quasi ogni settimana, e almeno due pescatori sono stati uccisi negli ultimi anni. Pescatori un tempo pacifici ora vanno in mare pesantemente armati e condividono rotte e profitti con i boss della droga. Il turismo è ridotto quasi a nulla, dato che dilagano storie di laboratori di metanfetamine vicino alle zone di pesca e di trafficanti di droga che sparano sulla polizia per difendere le barche dei pescatori di frodo.

«Nel mare di Cortez la pesca dovrebbe essere vietata», dice Oona Layolle, che organizza la campagna della Sea Shepherd. «Mari come questo sono così fragili, con un ecosistema così vasto, e considerando anche l'attuale numero di abitanti della Terra dovrebbero essere protetti».

Nel frattempo il numero ufficiale di vaquita è sceso a 30 esemplari. In un ultimo, disperato tentativo di salvare gli animali, una squadra congiunta statunitense e messicana sta progettando di catturarne il più possibile e conservarle in cattività.

La vaquita oggi rappresenta uno dei più drammatici fallimenti della gestione dell'ambiente, e la sua storia insegna lezioni cruciali sulla natura dei fenomeni di estinzione nel mondo moderno. Questa creatura non è stata sterminata dai coloni, come lo sventurato dodo, o da uno sviluppo umano dilagante, come il delfino cinese d'acqua dolce, e al contrario della tigre siberiana e del rinoceronte bianco non ha alcun valore commerciale. La vaquita è stata eliminata da un miscuglio letale di avidità, corruzione, miopia governativa, contrasti tra scienziati sulle cause del declino della specie e incapacità del Messico di stimolare l'impegno dei pescatori. Anche se queste lezioni arrivassero troppo tardi per la vaquita, potrebbero salvare innumerevoli altre specie sull'orlo dell'estinzione.

Un mammifero da scoprire

La vaquita, la cui scoperta è relativamente recente, non è sempre stata motivo di contesa. Nel 1950 il leggendario biologo marino Ken Norris stava girovagando sulle spiagge del golfo superiore quando incappò in un teschio di focena che giaceva al Sole. Era molto piccolo, e aveva una forma strana. Otto anni dopo, pur non avendone mai visto un esemplare vivo, pubblicò un articolo presentandola come focena portuale del golfo della California. Per i successivi vent'anni l'animale fu quasi uno spettro, che appariva di rado, solo quando se ne trovava uno spiaggiato vicino a un villaggio di pescatori. I ricercatori si chiesero se la pesca locale dei totoaba potesse minacciarne la sopravvivenza. I totoaba sono pesci ossei con un elevato valore commerciale, che si riuniscono ogni primavera vicino Santa Clara per riprodursi nelle acque locali ricche di sostanze nutritive. Pesante poco più di 45 chilogrammi, il totoaba è grande quanto la vaquita, che a sua volta ha un terzo delle dimensioni di una focena tipica, per cui non stupisce che vengano catturati dalla stessa rete.

In realtà, nel 1975 gli scienziati si stavano preoccupando del drastico calo della popolazione di totoaba, e quindi il Messico ne proibì la pesca. Tre anni dopo, una nuova legge protesse anche le vaquita, benché pochi, a parte i pescatori, vi fossero entrati in contatto. Al contrario dei delfini e dei leoni marini, le vaquita

Fonti: National Oceanic and Atmospheric Administration (*riserve marine*); National Geographic (*Colorado*)

odiano le barche ed evitano gli esseri umani; è complicato salvare una specie di cui gli scienziati non sanno nulla. Tutto questo cambiò nel 1985, quando il biologo Alejandro «Waffles» Robles arrivò a Santa Clara. All'epoca era dottorando al campus di Guaymas dell'Istituto di tecnologia e studi superiori di Monterrey e ufficialmente era lì per appurare se i totoaba fossero realmente in pericolo o se la pesca potesse essere nuovamente consentita, ma in realtà voleva scoprire la sfuggente focena messicana. E capì presto che non era possibile separare i destini delle due creature.

Waffles trovò i pescatori di frodo locali nelle stesso tratto di mare dove stava una delle guardie ittiche: invece di fermarli o arrestartli, li guardava tirar su le reti. All'epoca i pescatori non sospettavano dei biologi, e invitarono Waffles a bordo per aiutarli a issare le reti illegali. Un giorno di primavera raccolsero un bottino sconvolgente: due vaquita adulte e due giovani. Vedere un'intera famiglia morta «fu per me un momento molto triste», racconta Waffles, un uomo robusto e gioviale che adesso ha quasi sessant'anni. «Ma conoscevo il valore di quegli esemplari».

Waffles riuscì solo a pensare ai molti interrogativi a cui gli animali potevano dare risposta una volta esaminati in laboratorio. I più piccoli cetacei al mondo avevano ampi anelli neri attorno agli occhi e alla bocca come se fossero stati tracciati pesantemente col rossetto. In acque con visibilità nulla, a che cosa potevano servire quei segni facciali? Di che si nutrivano? Quella famiglia era sana o aveva subito gli effetti dell'inquinamento? La cooperativa di pesca locale gli permise di congelare gli animali nel suo stabilimento; prese i due esemplari adulti e salì su una corriera per Guayamas, dove i biologi della sua università avrebbero potuto esaminarli correttamente. Quando salì a bordo con i due cadaveri imballati come bagaglio, l'autista lo squadrò sospettosamente e gli chiese cosa si portava dietro. «Vaquita» rispose. «Ah, tipo legno ferro?», chiese l'autista, riferendosi a un tipo di legno duro usato nella regione per realizzare sculture. «Ehm, sì» rispose Waffles. Ma aveva dimenticato il posto di controllo doganale lungo il percorso. Sotto lo sguardo inorridito dell'autista, gli agenti estrassero dalla corriera una coppia di animali in via di scongelamento e chiesero di vedere le bolle di accompagnamento. Waffles mostrò un permesso per ossa di balena sperando non lo esaminassero attentamente. Gli agenti esitarono, mentre i passeggeri si innervosivano per il ritardo. «Così dissi loro: "D'accordo gente, se li volete prendeteveli" – ricorda Waffles – "Che ce ne facciamo? Va bene, potete andare"».

Il rapporto positivo tra pescatori e scienziati continuò per anni; le autopsie confermarono che si trattava di mammiferi che prendevano il nutrimento dal fondale e si riproducevano solo una volta ogni due anni. Ma rimaneva una domanda cruciale: perché erano così pochi? La risposta ovvia erano le reti per i totoaba, dato che ogni esemplare di vaquita era stato trovato cadavere lì dentro.

Ma questa risposta ignorava un elemento: il fiume Colorado. Per quasi un secolo gli Stati Uniti avevano costruito dighe per deviarne l'acqua, e nel 1980 il fiume aveva una portata così ridotta che non raggiungeva più il mare di Cortez, privando così la parte settentrionale del golfo dell'acqua dolce che vi aveva fluito per millenni. Centinaia di chilometri di ecosistemi fluviali e di alberi di carrubo presso la foce furono ridotti in polvere e sale, e gli scienziati si chiesero se fosse una coincidenza che una delle maggiori estinzioni dell'America settentrionale avvenisse a pochi chilometri da una delle più devastanti catastrofi ambientali.

Manuel Salvador Galindo Bect, all'epoca oceanografo all'Università autonoma della Baja California, in Messico, era convinto vi fosse un relazione tra i due fenomeni, e citava la decimazione della popolazione di gamberi nella parte nord del golfo. Il problema dei gamberi «era avvenuto più o meno allo stesso tempo di quello delle vaquita». All'inizio la questione scientifica era poco più che una curiosità, ma presto divenne il punto focale di una battaglia politica che affossò gli interventi per salvare la vaquita.

Tra conservazione e libero mercato

Le autopsie erano il principale strumento a disposizione degli scienziati per stabilire se i cambiamenti nella parte settentrionale del Golfo stessero danneggiando le timide focene, e il re delle autopsie era Jorge Torre, all'epoca all'Istituto di Monterrey. «Datemi un numero di protocollo e vi so dire a quale vaquita corrisponde. Il numero 930206 era una femmina in gestazione», racconta con palese orgoglio. «Era la mia vita. Cinque anni immerso nelle viscere di vaquita».

Torre scoprì che vaquita maschi e femmine hanno l'osso ioide di forma diversa, suggerendo che abbiano tipi di vocalizzazione distinti. Insieme ad altri osservò che la vaquita ha un dito extra sulle «mani», e quindi pinne anteriori più ampie, sebbene nessuno

Un totoaba mutilato abbandonato sul letto asciutto del fiume Colorado. I pescatori catturano questa specie protetta e ne estraggono la vescica natatoria, che viene spedita illegalmente in Cina, dove è venduta al mercato nero per migliaia di dollari perché si crede che abbia potenti effetti curativi.

sappia veramente perché. Le ricerche andarono avanti così; le vaquita erano in pericolo, certo, ma non era una cosa a cui pensassero molto i pescatori o il grande pubblico.

Le cose cambiarono quando fu redatto l'Accordo nordamericano per il libero scambio (NAFTA, North American Free Trade Agreement). Le trattative per l'accordo iniziarono nel 1990, e il presidente messicano Carlos Salinas vide subito che uno dei problemi principali con l'opinione pubblica sarebbe stato l'impatto ambientale negativo del NAFTA. Dopo averne discusso con esperti, tra cui il famoso oceanografo Jacques Cousteau, Salinas si concentrò sulla vaquita. Proteggere la piccola focena in difficoltà, così vicino al confine statunitense, sarebbe stata una testimonianza eccellente del suo impegno a favore dell'ambiente. Di colpo, la vaquita divenne terreno di scontro politico. «C'era tutta questa gente che mi chiamava e chiedeva che cosa c'entrassero vaquita e totoaba con il libero scambio», ricorda Waffles. «Io ero un biologo che sapeva a malapena che cosa significasse libero scambio».

In una plateale dimostrazione pubblica di ambientalismo, il Messico creò nella parte settentrionale del golfo una riserva marina per le vaquita. Il parco fu il primo passo verso il peggioramento dei rapporti tra gli scienziati e la comunità locale. I biologi avevano bisogno dei pescatori per ottenere esemplari da studiare, ma ora pescare nella riserva era un reato. Almeno sulla carta. La riserva non aveva un piano gestionale, nessun regolamento e nessuno che lo facesse rispettare. In teoria era vietato l'accesso ai grandi pescherecci, ma anni dopo quelli erano ancora lì. I pescatori locali non avevano la minima idea di quali fossero le regole.

Di conseguenza la gente pensò che le regole non fossero una cosa seria: a tutt'oggi neanche un pescatore o un mediatore è stato mai arrestato per la pesca di frodo. Parte del problema fu che il Messico mandava due messaggi contraddittori: la principale agenzia per l'ambiente del paese, SEMARNAT, affermava che le vaquita erano minacciate e andavano protette, mentre l'agenzia che rappresenta l'industria peschereccia, oggi nota come CONAPESCA, diceva che erano le flotte da pesca commerciali ad andare tutelate.

Una volta sostenne perfino che la vaquita non esisteva, che era una creatura estinta o un'invenzione degli ambientalisti statunitensi, una tesi che ricorre ancora oggi in alcune città. La disinformazione si diffuse a tal punto che nel corso di un pranzo di gala gli scienziati presentarono al ministro dell'agricoltura e dell'ambiente un cadavere di vaquita sopra un carrello da dolci, per dimostrare che l'animale esisteva davvero. Allora CONAPESCA tirò in ballo il fiume Colorado e incolpò gli avidi statunitensi e le loro dighe del declino delle vaquita, ma le autopsie non mostravano segni di malattie o inedia. A quanto pareva, le vaquita si erano adattate bene ai cambiamenti di alimentazione.

Disaccordo tra scienziati

Galindo Bect, che era il principale sostenitore della tesi del fiume Colorado, ora riconosce di non avere prove certe che la vaquita sia stata danneggiata dalle condizioni del fiume, ma dice che la ragione è che non sono stati effettuati i test giusti. I pescatori non perdono tempo a citarlo: «Conosco il dottor Galindo», dice Mario Alberto, pescatore da 25 anni. «Il problema della vaquita non sono i pescatori, è l'inquinamento».

Nel 1999 la popolazione di vaquita stava ancora calando, e via via che venivano proposte nuove riserve aumentava il livore. Dopo che il governo centrale messicano sospese temporaneamente la pesca di pesci a pinne nel golfo settentrionale, ritenendo che fossero le reti per quel tipo di pesce che catturavano le vaquita, i pescatori di Santa Clara diedero alle fiamme diversi autocarri governativi e inscenarono un rapimento simbolico di funzionari locali, che dovettero essere evacuati con gli aerei.

In questo caos emerse una terza spiegazione del declino delle vaquita: l'endogamia. I suoi sostenitori affermavano che in popolazioni di modeste entità possono emergere combinazioni genetiche «letali», causando una mortalità diffusa. È accaduto in Scandinavia, dove popolazioni isolate di serpenti e lupi sono state colpite da malattie genetiche. Questa tesi è stata usata da funzionari del governo nazionale per affermare che la vaquita «è condannata all'estinzione», spiega Lorenzo Rojas Bracho, che si è occupato della genetica delle vaquita e che ora collabora alla gestione di un gruppo multinazionale per le vaquita, chiamato CIRVA, che offre consulenze al governo messicano. Rojas Bracho ha esaminato 75 esemplari di vaquita forniti da pescatori e ha accertato che non erano in pericolo a causa dell'endogamia. A quanto pare, dato che la popolazione è sempre stata piccola e isolata, la specie aveva già eliminato tutti i geni letali. Se si potessero salvare gli animali dalle reti dei pescatori, in teoria la specie potrebbe riprendersi.

A seconda delle maree, a volte gli equipaggi scaricano il pescato di notte. Alcuni pescano corvine legalmente, altri no, e alcuni portano a riva totoaba, la cui pesca è vietata, e sono protetti da fuorilegge armati. Le forze dell'ordine possono avere difficoltà a distinguere chi sta facendo che cosa, o guardano da un'altra parte.

Da allora Rojas Bracho è diventato uno dei più pugnaci sostenitori della causa delle vaquita, dedicandosi in particolare a controbattere a quello che considera un diluvio di disinformazione da parte di gruppi come CONAPESCA. «Negli ultimi vent'anni non sono mai stato a una riunione dove non ci sia chi dice che [il problema] è l'assenza del flusso d'acqua del fiume Colorado», racconta.

Rojas Bracho non si fida di Galindo Bect e dei suoi legami con la pesca commerciale. Galindo Bect non si fida dei risultati scientifici di Rojas Bracho. L'unico punto sul quale i due concordano è che la pesca illegale di totoaba è ormai fuori controllo: dagli inizi di questo secolo i pescatori, che una volta erano essenziali per ottenere gli esemplari, sono diventati il nemico.

Il governo non è sempre stato contro i pescatori: nel 2007 ha offerto finanziamenti a quelli che restituivano la licenza di pesca in modo che avessero del capitale da investire in attività di turismo sostenibile. Costruite gli alberghi, hanno detto, e i turisti accorreranno. Ma nessuno ha mai chiesto se i turisti volevano venire. Mario Mora Rodriguez, pescatore da più di vent'anni, è stato uno di quelli che hanno accettato la proposta: racconta di aver sinceramente creduto di lavorare per salvare la vaquita dando allo stesso tempo un futuro alla propria famiglia. Ha costruito bungalow chiamati Tourist Cabins. Nessuno è mai venuto. Oggi il luogo è vuoto, vicino ad altri quattro alberghi deserti. La maggior parte dei suoi figli si è trasferita in cerca di lavoro.

Alla fine il governo, tramite CONAPESCA, ha assegnato nuove licenze ad altri pescatori, che spesso non rispettavano le riserve. Nel 2008, usando i sonar, gli scienziati hanno individuato solo 245 esemplari di vaquita, che significa che a partire dagli anni novanta la popolazione è diminuita di circa l'8 per cento all'anno.

Pesca di frodo e traffico di droga

Dal 2008 al 2010 il ritmo del declino è diminuito, alimentando temporaneamente le speranze, ma un'escalation del traffico di droga ha eliminato ogni possibilità di ripresa. Il presidente Felipe Calderón ha dichiarato guerra ai cartelli messicani, dando il via a uno dei periodi più sanguinosi della storia recente del paese. I cartelli hanno diversificato le loro attività aggiungendo prostituzione, rapimenti e, nella parte settentrionale della Baja California, il contrabbando di totoaba. «Ci siamo resi conto che i posti dove c'era traffico illegale di totoaba erano gli stessi in cui agiva il cartello di Sinaloa» spiega Andrés Estrada, un giornalista che ha trascorso mesi nelle comunità pescherecce investigando il commercio di totoaba. «Le rotte di trasporto erano molto simili».

Questo traffico non c'entra nulla con il cibo: la vescica natatoria dei totoaba è divenuta un ingrediente popolare nella medicina cinese. Dato che la fonte originale di vesciche natatorie – il *bahaba* cinese – era sull'orlo dell'estinzione, i trafficanti hanno iniziato a guardare al Messico, pagando 10.000 dollari al chilogrammo per la merce. I pescatori di frodo aprivano il ventre dei pesci sul litorale, estraevano la vescica natatoria e lasciavano le carcasse sulla sabbia a marcire al sole.

Estrada e due coraggiosi colleghi, Alejandro Melgoza ed Enrique Alvarado, hanno riferito di recente che i trafficanti di droga non solo trasportano i totoaba attraverso la frontiera fino a Los Angeles per poi spedirli in Cina, ma che uomini armati stanno di guardia quando i pescatori portano a riva il pesce, dato che il prezzo delle vesciche ha raggiunto quello della cocaina e della metanfetamina. La pesca di frodo dei totoaba è stata pienamente integrata nel crimine organizzato, dato che il consumo di droga è dilagato all'interno delle comunità di pescatori.

«Non ci sono pene, né condanne», racconta Estrada, che vede regolarmente gli uomini armati di guardia vendere metanfetamine ai pescatori mentre scaricano le barche. Il personale incaricato di contrastare i pescatori di frodo non è addestrato per identificare organi come le vesciche natatorie di particolari animali. La polizia ambientale, che è in grado di farlo, non ha l'autorità per mul-

tare o arrestare. Quando ho visitato la regione ho visto funzionari di CONAPESCA incaricati di controllare il pescato che degnavano a malapena di uno sguardo i camion carichi di pesce, mentre a pochi chilometri di distanza la spiaggia era disseminata di carcasse di totoaba.

Secondo alcune testimonianze, nel 2014 Samuel Gallardo, uno dei capi di una cooperativa di pesca, è stato abbattuto a colpi di arma da fuoco da un rivale del cartello di Sinaloa, probabilmente per una disputa sulle rotte di contrabbando. Un paio di anni dopo un altro pescatore, José Isaías Armenta, è stato ucciso dalla polizia locali. La spiegazione ufficiale è che gli hanno sparato perché resisteva all'arresto, ma gli abitanti di Santa Clara dicono che la ragione è che si è rifiutato di pagare tangenti legate al traffico di totoaba.

L'impatto sull'economia locale

Tra il 2011 e il 2015, dopo anni di lento declino, la popolazione di vaquita è crollata del 60 per cento e il numero di esemplari vivi è sceso a meno di 100. In un ultimo sforzo per salvarli, nel 2015 il governo messicano ha dichiarato una moratoria di due anni di tutta la pesca con reti nel golfo superiore, includendo quella ai gamberi e a un pesce più piccolo chiamato corvina. Benché meno preziose dei gamberi, le corvine danno lavoro a centinaia di persone nella zona, dai pescatori che le catturano agli abitanti delle città che le puliscono e le preparano per la spedizione.

Prima i titolari di una licenza per la pesca alle corvine erano il motore dell'economia locale, ma ora il governo paga circa 2000 dollari, per mese e per licenza, perché non peschino. Ma solo i pescatori più benestanti potevano permettersi una licenza, e quindi in città sono in pochi ad averle. I pescatori che lavoravano per loro ricevono circa 400 dollari al mese, molto meno di quanto serve per pagare i conti a fine mese, e chi lavorava a terra per pulire il pesce non riceve nulla. In altre parole, il governo sta versando una fortuna ai più ricchi, mentre i più poveri devono cavarsela da soli.

Enrico «Gringo» Assaf, che è titolare di sette licenze e dà lavoro a 12 pescatori, dice che il governo gli versa circa 10.000 dollari ogni mese per non far salpare le barche. Ha usato il denaro per costruire un albergo e mettere su un'attività di noleggio di veicoli fuoristrada. Assaf incolpa il governo per la disuguaglianze dei versamenti ai pescatori e per il pasticcio nei piani di conservazione ambientale.

Gli indigeni Cocopa sono i soli a poter avere la licenza di pesca alle corvine, ma dicono che persone estranee alla loro comunità riescono a ottenerle lo stesso, e si camuffano da indigeni per pescare indisturbati corvine e totoaba.

A marzo il governo ha annunciato l'estensione del blocco della pesca per un altro anno, ed è stato allora che i pescatori sono scesi in piazza dando alle fiamme gli autocarri federali, sostenendo però che la goccia che ha fatto traboccare il vaso è stato il tentativo di un funzionario corrotto di intascare denaro di nascosto. «Non so che cosa succederà domani o il giorno dopo», dice l'ex pescatore Alfonso Pita. «Ho una moglie, una figlia e un'altra figlia single con due bambini. Come devo comportarmi? Il poco denaro che avevo l'ho investito nella barca». Per lui e le figlie non c'è lavoro.

La corvina ha un sapore delizioso, e anche la sua vescica può essere venduta in Cina, anche se a una frazione del prezzo di quella di totoaba. A causa della moratoria, nessuno ha il permesso per pescare le corvine tranne i Cocopa, i membri di una comunità indigena del nord. Funzionari messicani e ambientalisti dicono che molti pescatori illegali di totoaba sono riusciti in qualche modo a ottenere le licenze riservate ai Cocopa e si travestono per sembrare indigeni. «Siamo invasi da estranei», dice Inés Hurtado Valenzuela, capo di una cooperativa di pesca cocopa. E fa notare che se gli indigeni pescassero i totoaba sicuramente li mangerebbero invece di estrarre le vesciche natatorie e abbandonare le carcasse a marcire come fanno i pescatori di frodo.

Non è difficile verificare quello che dice: mi offre un passaggio per andare a veder pescare i Cocopa. Pochi chilometri a sud della città il panorama cambia, e dalle chiome spettinate dei carrubi si passa a un paesaggio sterile di fanghiglia e stagni di sale: la devastazione causata dal maledetto fiume Colorado. Eppure, nel

bel mezzo della desolazione appare un grande villaggio: centinaia di pescatori trasportano corvine lungo un canale collegato con il golfo. Mentre seguiamo il canale affiora un cadavere di totoaba con le interiora squarciate. Più a valle ce ne sono a dozzine, massacrati alla svelta e abbandonati. Lungo il canale c'è un solo punto dove poter far uscire le corvine (o le vesciche di totoaba) illegali), ma quando passiamo il posto di controllo della CONAPESCA gli agenti danno a malapena un'occhiata alle corvine che si trovano sul retro del nostro autocarro.

Nel frattempo le vaquita continuano a scomparire: dal 2015 al 2016 la popolazione è diminuita del 50 per cento, fino a ridursi a soli 30 esemplari. Altri cinque sono stati trovati morti nella primavera del 2017.

Un segno premonitore

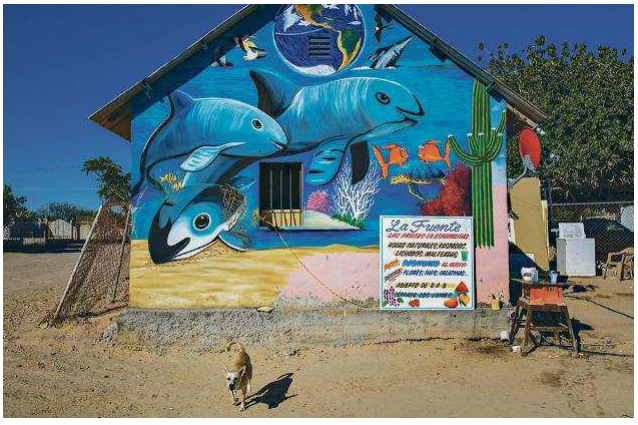
È facile puntare il dito sui responsabili per l'estinzione delle vaquita. La colpa è di CONAPESCA, che si rifiuta di stimolare i pescatori. È dei pescatori, che non denunciano chi tra loro pesca di frodo. È di SEMARNAT, che si rifiuta di proteggere seriamente le specie in pericolo. È delle forze dell'ordine, che battono la fiacca. È del governo di Città del Messico, che crea riserve sulla carta (adesso siamo arrivati ad averne tre) che non hanno alcun senso in mare aperto. È degli statunitensi, che sottraggono l'acqua al fiume Colorado. È dei biologi e dei protettori dell'ambiente, che si lamentano in continuazione degli abitanti locali che non hanno alcun potere. È degli abitanti locali più potenti, che fanno rimanere poveri tutti gli altri. È prima di tutto dei cinesi, che hanno creato il mercato. È dei cartelli della droga, che fanno aumentare vertiginosamente la pesca di frodo.

A prescindere dai responsabili, la vaquita è più di un semplice animale solitario in attesa di lasciare per sempre le torbide acque del golfo. Piuttosto, è un segno premonitore delle estinzioni del XXI secolo. Nessuno può dire quale animale sarà il prossimo, ma possiamo descriverlo. Proverrà da una popolazione piccola e isolata, sarà una creatura altamente lucrativa oppure collegata a una di queste creature, e vivrà in un paese in via di sviluppo le cui istituzioni stanno andando a pezzi.

Gli esperti citano dozzine di altre specie che stanno affrontando problemi simili a quelli della vaquita. Il delfino del Gange è una specie geograficamente limitata, e resta spesso impigliato nelle reti: la sua popolazione è diminuita di più del 50 per cento negli ultimi 60 anni, scemando fino a meno di 2500 esemplari al giorno d'oggi. Il numero di esemplari dello squalo dal muso a stiletto della costa settentrionale del Sud America è calato del 90 per cento in dieci anni a causa della sua lenta riproduzione e della carenza di regolamenti per la pesca allo sgombro.

I pastori di capre cashmere, nell'Asia centrale, uccidono a caso esemplari di leopardo delle nevi, una specie minacciata, per proteggere le proprie bestie che riforniscono i mercati di lusso esteri. Rinoceronti, elefanti e buceri dall'elmo sono tutte creature di valore, commerciate in Asia dall'Africa e dall'Indonesia da organizzazioni criminali che sfruttano la debolezza delle autorità locali. I pangolini, piccoli mammiferi dotati di scaglie, vengono catturati dai bracconieri e al mercato nero venduti direttamente in loco con la complicità del governo.

In un certo senso la vaquita si è trovata nel bel mezzo dello stesso problema che ha strangolato buona parte del Messico e dei paesi in via di sviluppo; la nazione semplicemente non ha le capacità per far rispettare tutte le leggi, specialmente se deve far fronte al crimine organizzato.



L'attivista Hilda Somoza (*in alto, con la camicia bianca*) organizza petizioni tra i residenti di Santa Clara che una volta pulivano e impacchettavano il pesce. Il governo paga i titolari delle licenze di pesca per le corvine perché non salpino, nel tentativo di ridurre la depredazione degli oceani, ma non offre niente a chi lavorava a terra, che rimange disoccupato. Sotto, a Santa Clara dei venditori di frutta hanno dipinto un murale per ricordare che le vaquite sono vittime innocenti di lotte intestine e criminalità. «Possono sembrare allegre – si legge – ma stanno morendo».

Potrebbe essere ancora più difficile accettare il fatto che, sebbene sia facile pensare che la vaquita è un tesoro appartenente a tutto il mondo, in realtà appartiene ai pescatori locali: furono i primi a notarla, le diedero un nome e furono loro a fornire esemplari e congelatori agli scienziati che a loro volta informarono i legislatori che vararono la legge per limitare la pesca. Senza l'aiuto dei pescatori locali, la vaquita non ha speranze di salvezza.

Il più grave errore commesso dagli ecologisti, di conseguenza, è stato quello di mandare i biologi a fare un lavoro da assistenti sociali. Un esempio è Catalina López-Sagástegui: nel 2006 era una scienziata idealista eccitata all'idea di poter partecipare a un programma di tutela dei mammiferi marini. Si recò nella parte settentrionale del golfo della California dopo aver collaborato a un progetto per la tutela delle balene grigie vicino alla Baja California, e capì presto che la tutela delle vaquita non era un progetto come tutti gli altri: i pescatori litigavano regolarmente tra loro e abbandonavano le riunioni. López-Sagástegui rimase confusa e affasci-

nata: perché mai non riuscivano a capire qual era la strada giusta da seguire?

Dopo aver fatto parte della comunità per dieci anni, si è resa conto che i problemi che minacciano la vaquita non hanno nulla a che vedere con la scienza, ma sono legati al comportamento umano. Spiega che, come molti altri, non era preparata a gestire le dinamiche in gioco: «Gli ecologisti non sono esperti di sviluppo sociale. Non posso credere che siano rimaste solo 30 vaquita al mondo e ciò nonostante proponiamo sempre le stesse [vecchie] idee».

Nessuna comunità della storia ha mai accettato di cambiare solo per compiacere il governo o alcuni stranieri ben intenzionati

Oggi López-Sagástegui fa parte di un'istituzione transfrontaliera chiamata Università della California-Istituto per il Messico e gli Stati Uniti, e racconta che il governo e le organizzazioni per la tutela ambientale stanno tentando di usare la bacchetta magica per trasformare i pescatori in qualcos'altro, senza avere la minima idea di che cosa. Invece di stabilire che cosa non possono fare i pescatori, come usare le reti da pesca e catturare i totoaba, dovrebbero concentrarsi sulla creazione di opportunità occupazionali e la programmazione di strategie sostenibili.

Sperando in un miracolo

Oggi è rimasta un'unica possibilità praticabile: in un tentativo disperato, questo autunno biologi messicani e statunitensi useranno delfini ammaestrati per accerchiare il più alto numero possibile di vaquita, catturarle e farle riprodurre in cattività. Ma benché la riproduzione in cattività abbia salvato animali terrestri come il condor della California, finora non ha mai funzionato con i mammiferi marini. Inoltre, nessuno ha mai catturato di proposito una vaquita, e tanto meno ha provato a tenerla in vita abbastanza a lungo per riprodursi.

Può darsi che, come la focena comune, la vaquita possa essere catturata e tenuta facilmente in cattività, ma è altrettanto possibile che ciò non si verifichi. Se la cattività dovesse fallire «Allora, beh, ci abbiamo provato», dice Barbara Taylor, una biologa marina della National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) che collabora alla direzione del progetto marino e ha trascorso tutta la vita a studiare i cetacei a rischio di estinzione. «La partita è persa». Un'intera specie dipende da 30 individui e da un piano disperato per metterli in un acquario sperando in un miracolo.

Quest'ultimo tentativo sarà portato avanti senza l'aiuto degli scienziati che si sono occupati per primi della vaquita. Molti di quei primi guerrieri sono esauriti dall'acrimonia e dalla politica legate alla battaglia. Esausti dallo stallo della situazione, Torre e Waffles si sono quietamente allontanati dallo scontro massacrante e hanno trovato lavoro altrove; ironicamente, ora lavorano entrambi in una nuova tipologia di progetti ecologici in Messico che sta avendo un successo strepitoso.

Nel 1999 Torre, il grande esperto di autopsie, ha cofondato un'organizzazione senza fini di lucro chiamata COBI per far rivivere la pesca di aragoste e altri animali. Il suo gruppo comincia ogni intervento considerando i bisogni dei pescatori invece che quelli degli animali, e prima che qualcuno pronunci la parola «conservazione» instaurano un dialogo sul futuro della comunità. Grazie a questo approccio sono riusciti a coinvolgere intere comunità in una gestione collettiva degli oceani. Da quando COBI ha iniziato a lavorare con i pescatori dello Yucatán, questi hanno assistito a un aumento del 250 per cento nella pesca delle aragoste e del 130 per cento con le altre specie commerciabili. «Lavoriamo a stretto contatto con CONAPESCA sulle cose fondamentali – racconta. – Oltre a salvare queste benedette specie, costruiamo un rapporto di fiducia».

Torre riesce a malapena a contenere la sua frustrazione quando ripensa al disastro delle vaquita. Racconta che, nonostante tutti gli sforzi dei migliori cervelli messicani e statunitensi, gli scienziati continuavano a discutere sulle stesse cose, che si trattasse di regolamenti, reti da pesca o del fiume Colorado. Incaponirsi sulle proprie idee e su quelle delle proprie organizzazioni invece di collaborare è stato devastante.

Waffles adesso gestisce un'organizzazione denominata Northeast Sustainable che sviluppa strategie di conservazione ambientale a partire dalla base nella regione di La Paz, circa 900 chilometri a sud di Santa Clara. Alcuni anni fa il gruppo ha contattato una comunità di pescatori che pescavano di frodo vicino a un'isola dichiarata riserva naturale e ha offerto loro un'alternativa. Insieme ai pescatori ha rinnovato un estuario a lungo considerato defunto che si trovava a pochi chilometri dalla più grande città della zona, e lo ha destinato all'allevamento delle vongole. Invece di pagare i locali per non andare a pesca, l'organizzazione li paga per gestire le risorse, effettuare indagini biologiche, rilasciare le vongole e difendere i banchi di bivalvi dai pescatori di frodo. Ora i pescatori gestiscono un allevamento sostenibile di vongole dal valore di milioni di dollari e questa estate c'è stato il primo raccolto.

Guidando nei dintorni di La Paz, Waffles si dice triste perché la stessa trasformazione non ha potuto aiutare la vaquita. Più tardi, seduto in un ristorante sull'oceano, si confida: «Sono assolutamente sicuro che l'unica soluzione possibile per la vaquita è che i pescatori decidano di loro spontanea volontà di salvarla». Osserva che nessuna comunità nella storia ha mai accettato un cambiamento radicale solo per compiacere un governo o un gruppo di stranieri benintenzionati. Che piacciano o meno i pescatori di una certa zona, afferma, sono gli unici che possono salvare una specie animale. Nel golfo settentrionale sono bloccati in un circolo interminabile di biasimo e conflitti. Ma le comunità di pescatori di qualsiasi luogo accetteranno cambiamenti profondi pur di ottenere un futuro per sé e le loro famiglie.

Una delle cinque vaquita trovate morte questa primavera era stata ripetutamente pugnalata, probabilmente da qualcuno che cercava di nasconderla alle autorità o magari soltanto per rabbia. Al contrario, giù a La Paz Waffles mi racconta di una recente conversazione che ha avuto con la figlia di un ex-pescatore di frodo diventato coltivatore di vongole:

«Che mestiere fa tuo padre?», le aveva chiesto.

Ha risposto: «Mio padre è un esperto di ristorazione, un acquacoltore... E un pescatore». ■

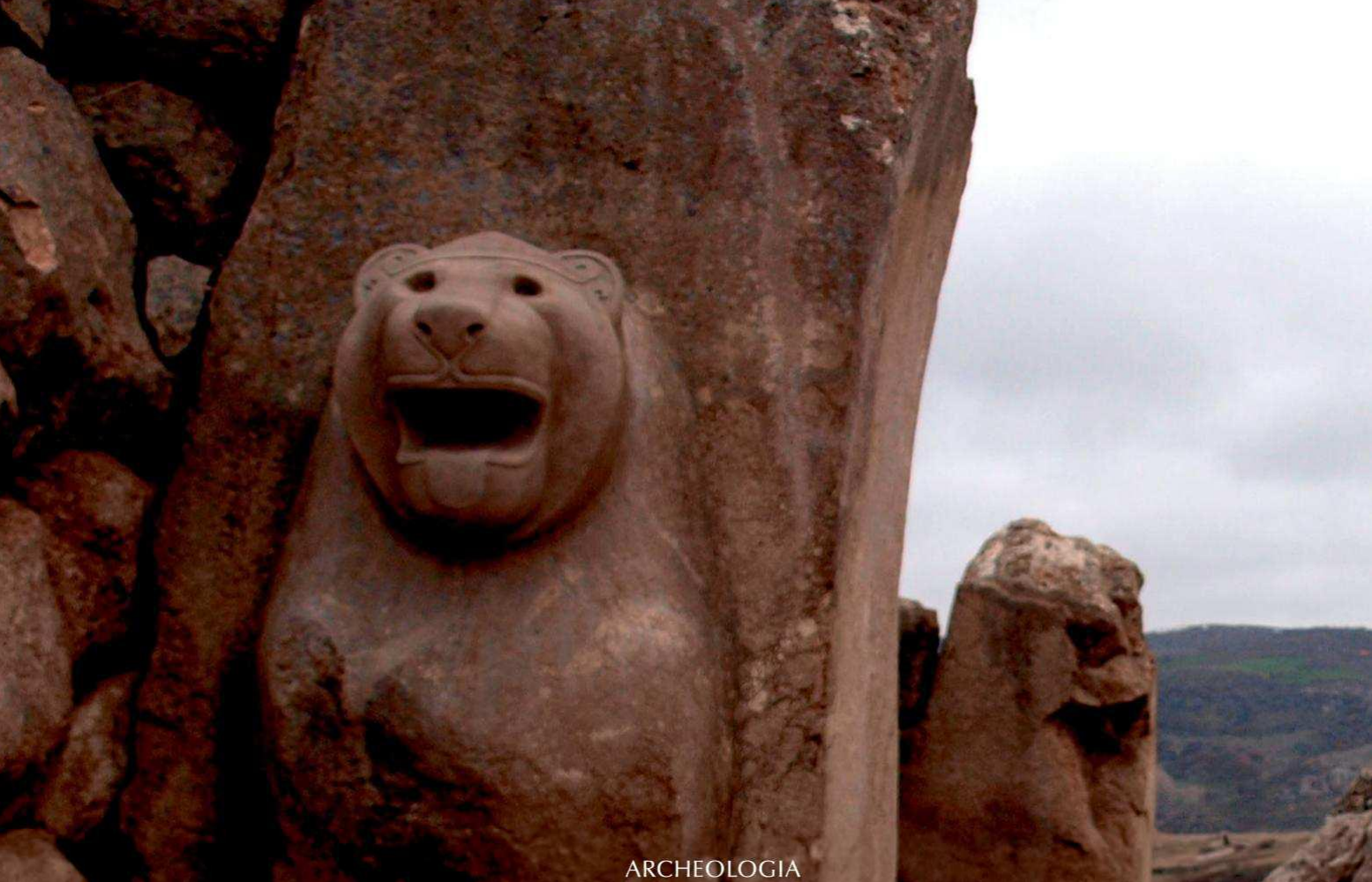
PER APPROFONDIRE

Conservation of the Vaquita *Phocoena sinus*. Urojas-Bracho L. e altri, in «Mammal Review», Vol. 36, n. 3, pp. 179-216, luglio 2006.

Emptying the World's Aquarium. Vance E., in «Harper's Magazine», pp. 53-62, agosto 2013.

Science, Society, and Flagship Species: Social and Political History as Keys to Conservation Outcomes in the Gulf of California. Cisneros-Montemayor A.M. e altri, in «Ecology and Society», Vol. 21, n. 2, articolo n. 9, giugno 2016.

Assassini insospettabili. Solomon L., in «Le Scienze» n. 539, luglio 2013.

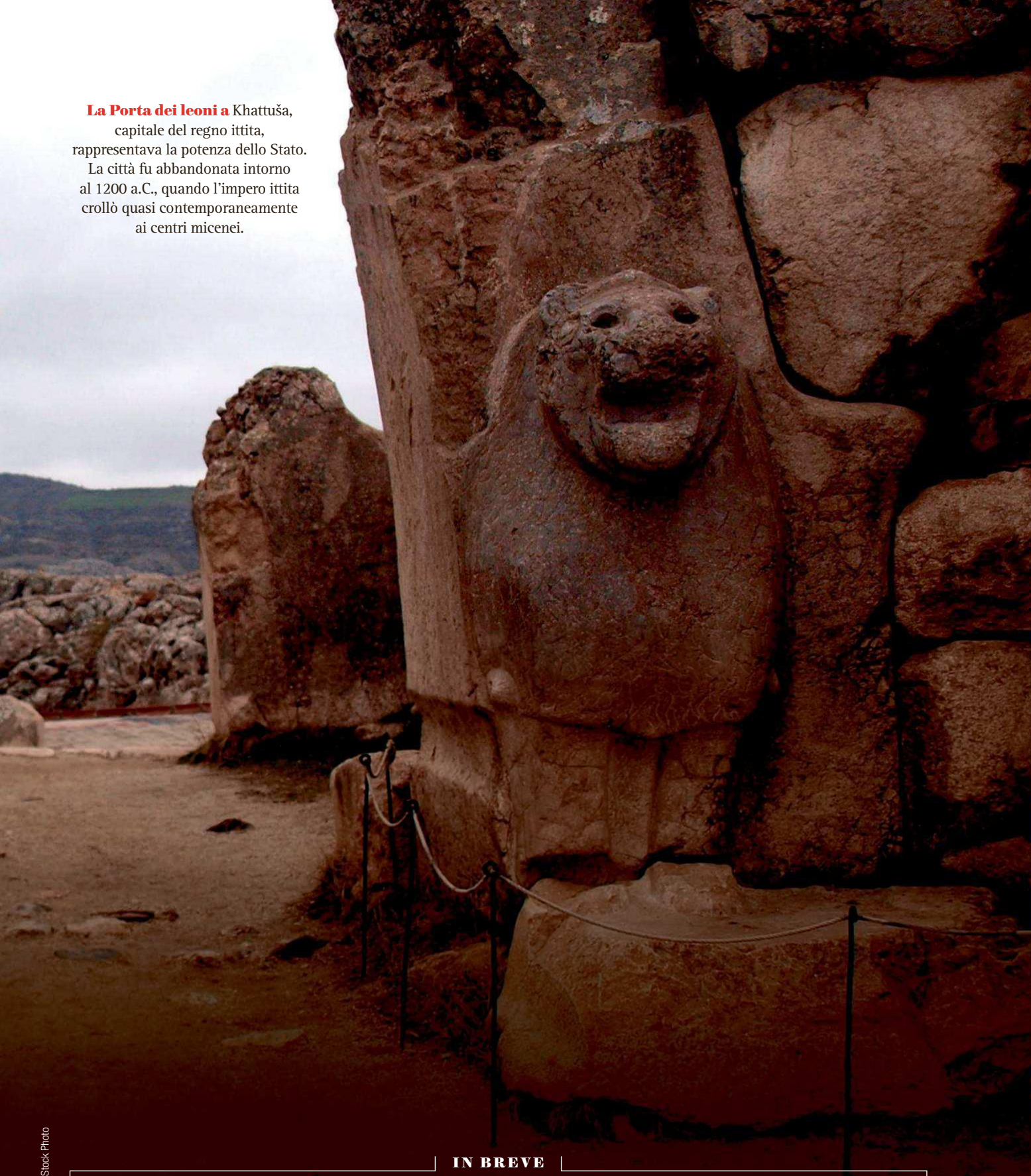


ARCHEOLOGIA

COLLASSO DI CULTURE

I possenti palazzi della Grecia micenea furono distrutti da incendi, i villaggi furono devastati, intere regioni furono spopolate. Benché i funzionari dei palazzi registrassero fino alla fine il loro lavoro, le ragioni del brusco declino rimangono un mistero

di Josef Fischer



La Porta dei leoni a Khattuša, capitale del regno ittita, rappresentava la potenza dello Stato. La città fu abbandonata intorno al 1200 a.C., quando l'impero ittita crollò quasi contemporaneamente ai centri micenei.

David Jennings/Alamy Stock Photo

IN BREVE

Intorno al 1200 a.C. i palazzi micenei furono distrutti da incendi, l'impero ittita si dissolse e vari piccoli Stati nell'Asia Minore e sulla costa del Levante furono annientati.

A partire dall'Ottocento i ricercatori ipotizzano come possibile causa della fine violenta dell'Età del bronzo i bellicosi «popoli del mare», ma finora nessuno è riuscito a identificarli chiaramente.

Altre possibili cause della crisi potrebbero essere terremoti e un periodo di siccità. Ma è presumibile che il collasso culturale nell'area del Mediterraneo orientale non sia dovuto a una sola causa.

Josef Fischer è laureato in storia antica e insegna preistoria greca all'Università di Passau. Vive a Cracovia.

Il Mediterraneo era in pieno sommovimento. L'economia era in preda a una crisi profonda, gli stati sprofondavano nel caos, i governi venivano abbattuti e città un tempo fiorenti erano ormai ridotte in macerie e cenere. Migliaia di persone erano in fuga, alla ricerca di una nuova casa. Tutto questo può suonare familiare, eppure non sto descrivendo la situazione attuale del Vicino Oriente odierno. Sto parlando di una crisi fondamentale risalente a 3200 anni fa, che può essere considerata un punto di svolta nella storia universale. Nuove ricerche proiettano oggi più luce sullo sfondo di queste trasformazioni epocali.

Durante la tarda Età del bronzo fiorì in Grecia e nelle isole dell'Egeo la grande civiltà micenea, che trovò il suo massimo sviluppo durante il cosiddetto periodo palaziale, dal 1400 al 1200 a.C. Possenti cittadelle e sepolcri monumentali manifestavano la ricchezza e l'influenza dei sovrani protogreci. Un sistema di strade percorreva il paese e attestava le conoscenze tecniche dei costruttori greci, che realizzavano strade e ponti abbastanza larghi da permettere il passaggio di carri da guerra e resi più sicuri da muri di sostegno e passaggi per lo sfogo dell'acqua. Ebbero origine a quell'epoca i tre «Ponti di Arcadico», che collegavano vari centri del Peloponneso col porto di Palea Epidauro. Gli «ingegneri» più antichi manifestarono le loro capacità costruendo anche canali e dighe con cui prosciugarono estese paludi. Per esempio, strapparono al bacino del copale, una resina simile all'ambra ma non ancora completamente fossilizzata, delle aree di terreno coltivabile, che poi tornarono sommerse dall'acqua, fino al XIX secolo, quando furono prosciugate da ingegneri francesi, che ristabilirono così il collegamento con costruzioni del periodo miceneo.

Nei palazzi i visitatori potevano ammirare dipinti murali dai colori vistosi e rilievi impressionanti come la Porta dei leoni a Micene, ma anche intagli in avorio e sculture in piccolo formato in argilla e metallo. Sulla base di due scritture sviluppate in precedenza nella cultura minoica di Creta – la lineare A e un sistema di geroglifici – ebbe origine la scrittura sillabica lineare B in materia amministrativa, per esempio per elencare le quantità di merci presenti in un magazzino o per tenere la contabilità del personale, con le relative mansioni e remunerazioni.

Dall'apogeo alla catastrofe

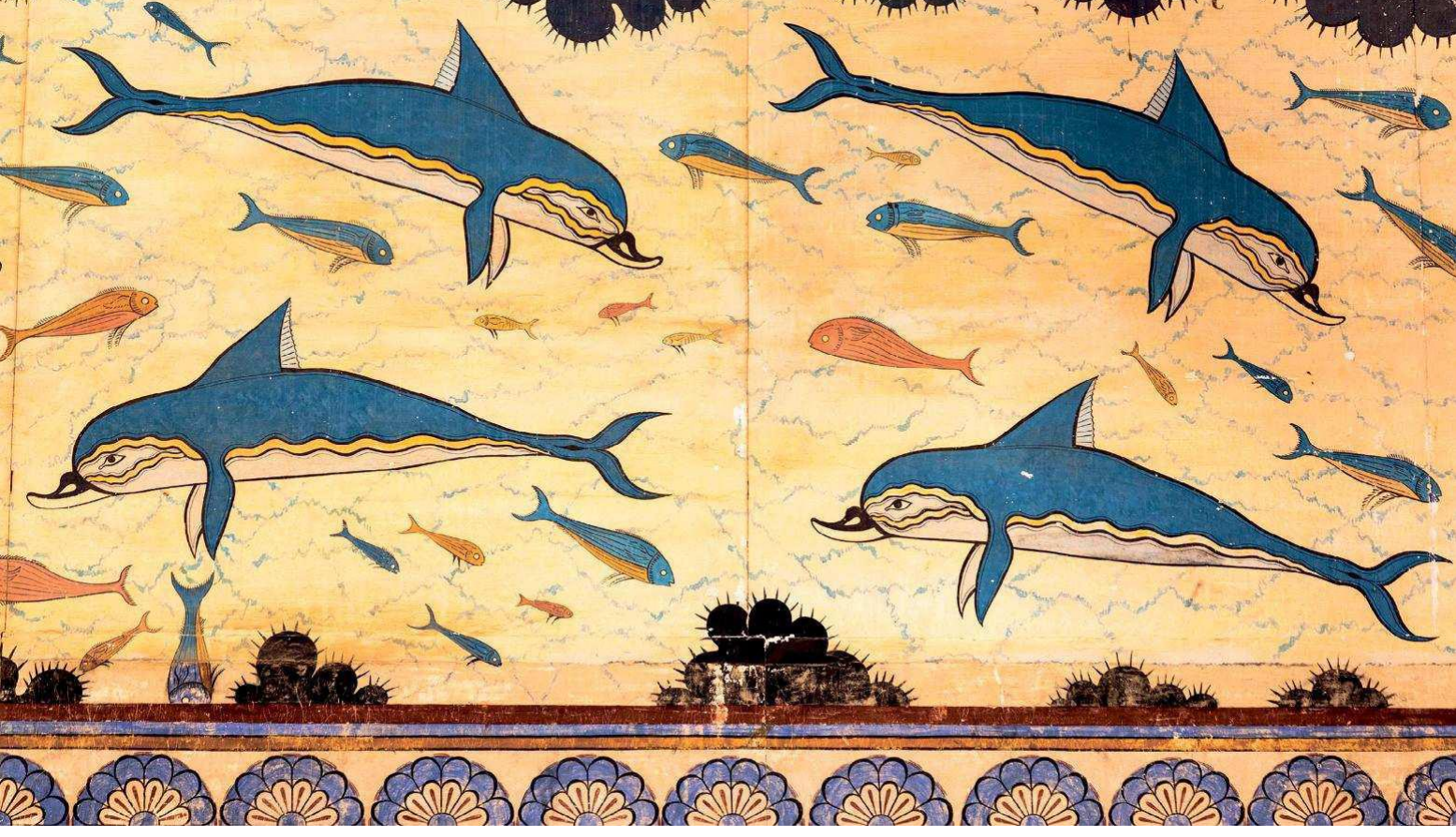
A quest'epoca la cultura micenea si irraggiò nell'intero Mediterraneo. Non soggiacquero alla sua influenza solo Creta e le Cicladi, ma anche a Rodi, a Coo e in Asia Minore furono costituite basi d'appoggio. Le élite micenee mantennero stretti rapporti tanto con i popoli del Mediterraneo occidentale e dell'Europa centrale quanto con le grandi civiltà del Vicino Oriente. Fonti scritte e reperti archeologici attestano per esempio rapporti fra i principi greci e il grande re degli ittiti, i reggenti sulla Costa del Levante come pure il faraone d'Egitto.

Tutti questi regni avevano legami sorprendentemente stretti fra loro e praticavano un attivo commercio di scambio. Gli archeologi marini hanno recuperato prove particolarmente spettacolari delle merci prodotte e dell'estensione degli scambi dai relitti di navi affondate. Così una nave naufragata più di 3300 anni fa presso il capo di Uluburun, davanti alla costa meridionale dell'attuale Turchia, trasportava un carico considerevole, chiaramente diretto verso nord. Era costituito da 10 tonnellate di lingotti di rame provenienti da Cipro, una tonnellata di lingotti di stagno provenienti probabilmente dall'Estremo Oriente, 350 chilogrammi di vetro blu proveniente dall'area siro-palestinese, la resina del terebinto, apprezzata nella produzione di profumi e in terapia, vasi, armi e utensili. Furono recuperati anche prodotti di lusso come legno di ebano e avorio, ambra gialla del Baltico e uno scarabeo egiziano.

Questa età dell'oro si tramutò improvvisamente in una catastrofe. In Grecia palazzi e insediamenti furono distrutti da incendi e alcune regioni, come l'antico territorio della Messenia, furono addirittura spopolate: nel XII secolo a.C. vivevano ancora esseri umani solo in un decimo dei loro insediamenti. La qualità dei prodotti, come quella degli edifici, calò. La scrittura lineare B, commisurata esattamente alle esigenze dei palazzi, fu dimenticata, e si trovò una scrittura in grado di subentrarle solo più di 400 anni dopo. Gli studiosi di questo periodo della protostoria greca parlano spesso di «epoca buia» della Grecia, ma gli scavi degli ultimi anni hanno corretto questa immagine.

La catastrofe non colpì solo la terraferma greca. Contemporaneamente si sgretolò l'impero degli Ittiti in Anatolia, numerosi piccoli regni del Levante come la città cananea di Ugarit conobbero una fine violenta, e l'Egitto riuscì solo a fatica a respingere l'invasione di popoli stranieri. Secondo ricerche più recenti anche Troia, sulla costa dell'Asia Minore, fu colpita da violenze e distruzioni. Ma d'altra parte non possiamo stabilire con precisione se questi fatti storici siano alla base del mito di Troia.

Gli esperti hanno proposto molte spiegazioni, specialmente per la fine dei palazzi micenei. All'inizio del secolo scorso l'hanno collegata con movimenti di popolazioni su cui le fonti antiche riferiscono nel tempo seguito alla guerra di Troia. Si è pensato in particolare all'immigrazione della tribù greca dei Dori nel Peloponneso. Secondo un mito greco vi governò il semidio Eracle, ma la moglie di Zeus, Era, fece in modo che il trono andasse a un re miceneo e i figli di Eracle dovettero fuggire. I dori avrebbero imposto il loro diritto per mezzo di molte campagne di guerra. In effetti la distribuzione dei dialetti greci, quale si può desumere da testi dell'epoca arcaica (circa 750-500 a.C.), suggerisce un'immigrazione di gruppi dorici, ma mutamenti nelle usanze funerarie e nei modelli di insediamento fanno pensare che si sia verifi-



L'Affresco dei delfini nel megaron della Regina del palazzo di Cnosso. Il palazzo fu distrutto una prima volta da un terremoto, intorno al 1700 a.C., e poi dagli invasori micenei nel 1450 a.C. circa.

cata solo nell'XI secolo a.C. In ogni caso non si può immaginare un attacco in massa di uomini armati in grado avere la meglio su borghi fortificati, ma piuttosto un afflusso più o meno costante di gruppi minori nelll'arco di diversi decenni.

Scenari alternativi di declino

Come cause del declino si è pensato anche a sommosse popolari. Come rivelano i testi della scrittura lineare B, i palazzi micenei erano governati con energia, e i «dipendenti» dei principi dovevano fornire lavoro e tasse. Potrebbe essersi scatenata un'insoddisfazione accumulata e violenta. Tuttavia, a giudizio della maggior parte degli esperti i palazzi micenei erano unità politiche indipendenti, e appare poco plausibile che vi si verificassero rivolte quasi contemporaneamente. Tuttavia, anche se le tensioni sociali non furono gli stimoli immediati delle distruzioni, furono forse fra le cause che indebolirono l'antico sistema.

Diversi miti lasciano intendere che ci furono tensioni anche fra i singoli Stati micenei. Fra questi ci sono in particolare *I Sette contro Tebe* (celebrati da Eschilo nella tragedia omonima) e la «guerra degli epigoni»: Eteocle e Polinice, figli del re tebano Edipo, dovettero accordarsi di governare a turno, dandosi il cambio ogni anno. Eteocle però non si dimise alla fine dell'anno, ma scacciò il fratello. Questi si rifugiò ad Argo, dove sposò la figlia del re Adrasto. Con l'aiuto del suocero e di altri principi, Eteocle tentò di impadronirsi del potere nella sua città natale. In questa lotta perirono quasi tutti: Eteocle e Polinice si uccisero reciprocamente. Dieci anni dopo ebbero più successo i figli dei Sette, i cosiddetti epigoni. Ma anche queste guerre interne all'ambiente miceneo non riescono a spiegare in modo soddisfacente il tramonto di tutti i piccoli Stati.

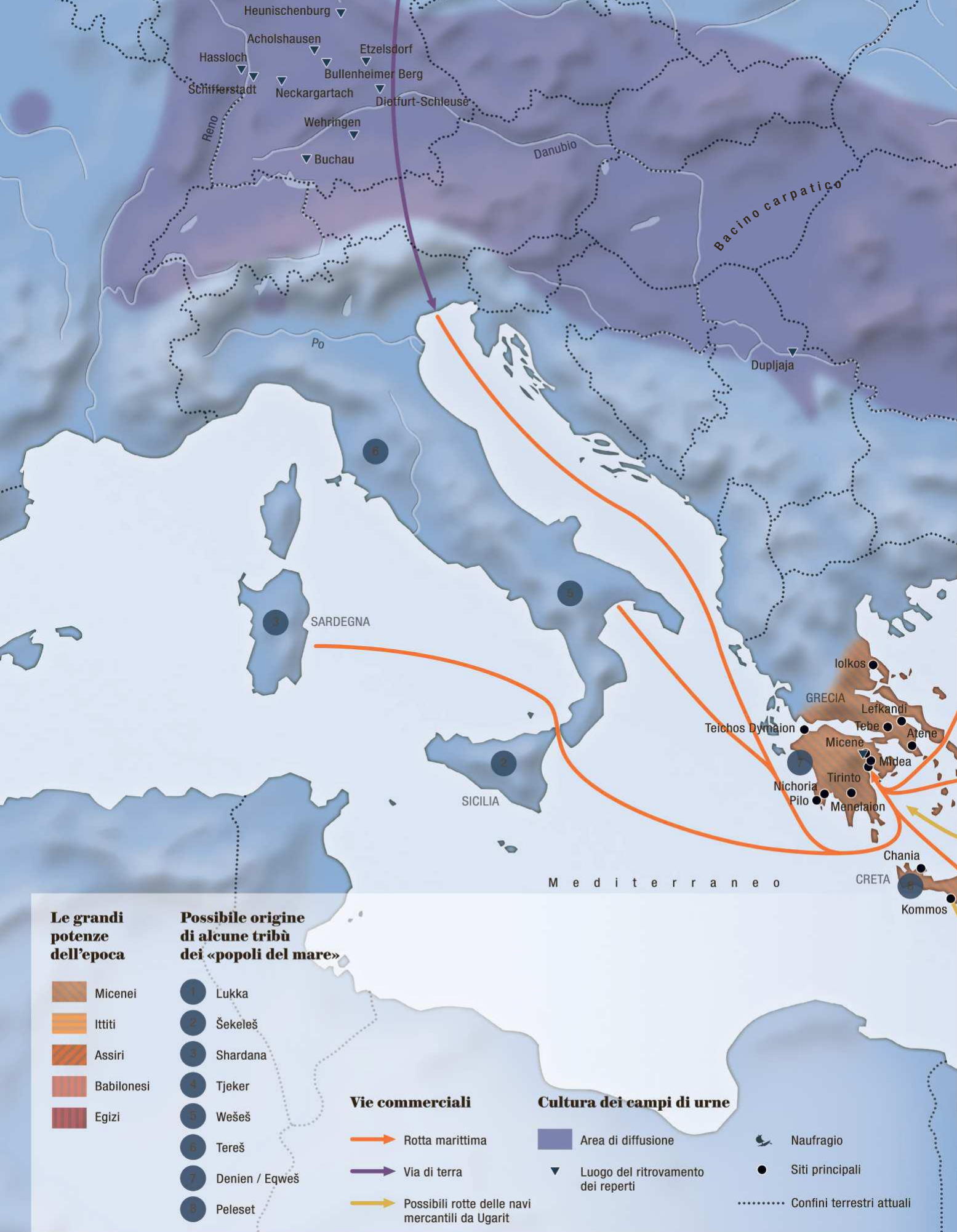
Le amministrazioni palaziali funzionarono probabilmente fino alla fine, e in ogni caso i loro funzionari registrarono ingressi e uscite di merci ancora nell'anno della distruzione dei palazzi. Mancano però le abituali annotazioni sulla tosatura delle pecore: probabilmente l'anno amministrativo non era ancora arrivato alla stagione della tosatura. Il micenologo britannico John Chadwick (1920-1998) ipotizzò che Pilo (Navarino) fosse stata distrutta in primavera. Di sicuro c'è solo che la cultura palaziale greca conobbe una brusca fine.

D'altronde c'erano stati segni premonitori, come scoprirono gli archeologi: alcuni decenni prima, intorno alla metà del XIII secolo a.C., furono incendiati alcuni edifici esterni alla cittadella di Micene ma comunque appartenenti al palazzo. Furono inoltre evidenziati danni alla roccaforte di Tirinto e al palazzo di Tebe.

Qualunque cosa fosse accaduta, i regnanti reagirono rapidamene. L'Acropoli di Atene ricevette un robusto muro fortificato, il sovrano di Micene fece ampliare le sue costruzioni e vi integrò aree della rocca in precedenza non protette. In questo periodo sorse anche l'ingresso monumentale noto come «Porta dei leoni», che era più facile da difendere. Anche l'area di Tirinto, nota come rocca inferiore, fu presto nascosta all'esterno da mura difensive ciclopiche, che ampliarono considerevolmente l'intera area protetta, creando per giunta una quantità di spazio per magazzini, officine ed edifici amministrativi. Dappertutto si scavarono canali e condotti nelle rocce per aprire sorgenti e assicurare quindi l'approvvigionamento d'acqua.

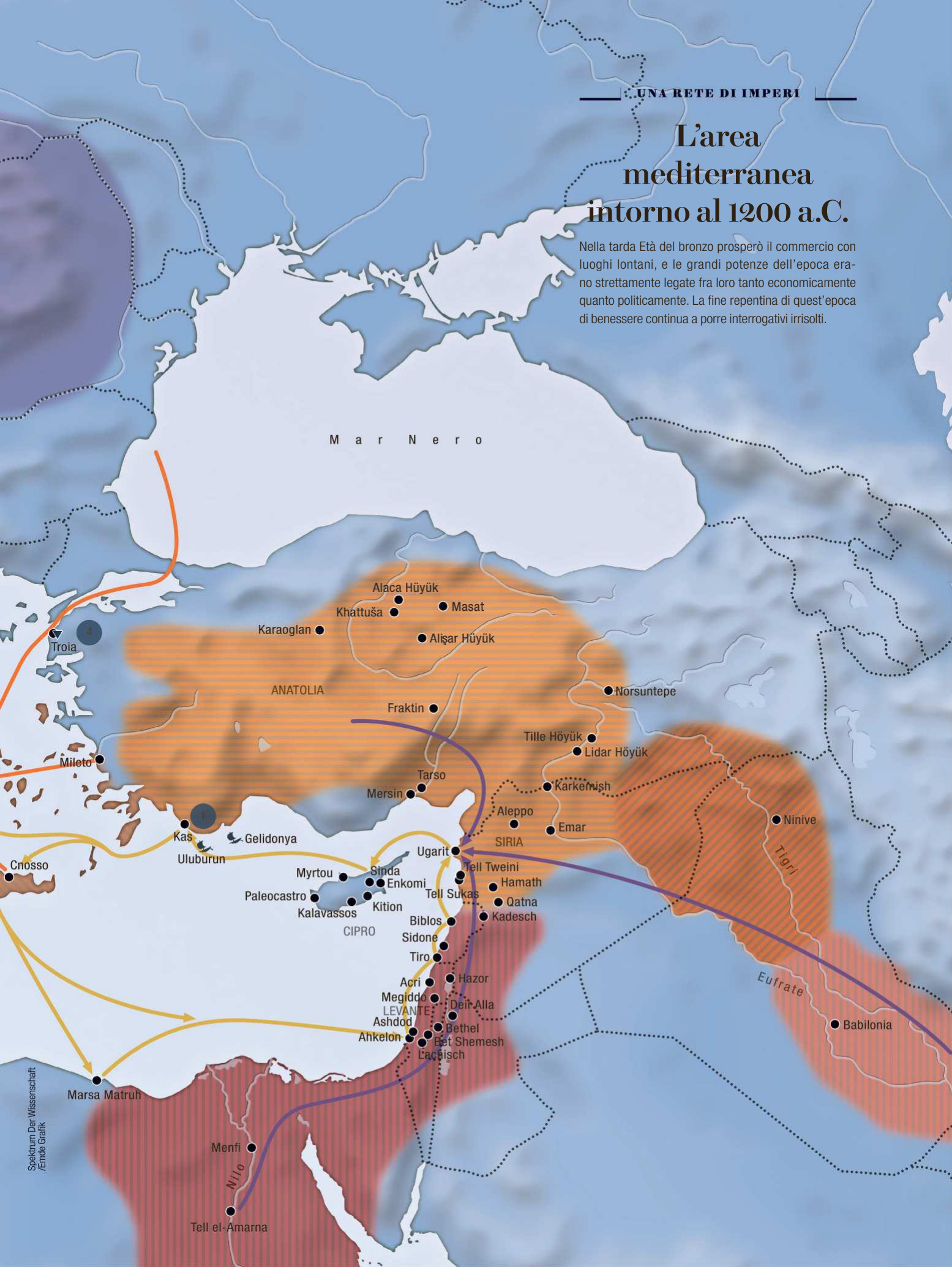
Tutte queste attività servivano alla protezione e alla difesa della sede dei regnanti, e miravano a impedire che venisse assediata ed espugnata. Questo accresciuto bisogno di sicurezza si rispecchia forse in un muro «ciclopico» nell'istmo di Corinto, l'unico accesso per via di terra dalla terraferma greca al Peloponneso: i blocchi di pietra usati nella sua costruzione erano così immani che varie generazioni dopo venivano ancora considerati opera di giganti monocoli. Vari decenni fa l'archeologo statunitense Oscar Broneer scoprì alcuni segmenti della sua costruzione. I resti di ceramiche

LatitudeStock/Alamy Stock Photo


Heunischenburg
Acholshausen
Etzelsdorf
Hassloch
Bullenheimer Berg
Schifferstadt
Neckargartach
Dietfurt-Schleuse
Wehringen
Buchau
Reno
Danubio
Bacino carpatico
Po
Dupljaja
SARDEGNA
SICILIA
Iolkos
GRECIA
Lefkandi
Teichos Dymàion
Tebe
Atene
Micene
Midea
Tirinto
Nichoria
Pilo
Menelaion
Chania
CRETA
Kommos
Mediterraneo
Le grandi potenze dell'epoca
Micenei
Ittiti
Assiri
Babilonesi
Egizi
Possibile origine di alcune tribù dei «popoli del mare»
1 Lukka
2 Šekeleš
3 Shardana
4 Tjeker
5 Wešeš
6 Tereš
7 Denien / Eqweš
8 Peleset
Vie commerciali
Rotta marittima
Via di terra
Possibili rotte delle navi mercantili da Ugarit
Cultura dei campi di urne
Area di diffusione
Luogo del ritrovamento dei reperti
Naufragio
Siti principali
Confini terrestri attuali

L'area mediterranea intorno al 1200 a.C.

Nella tarda Età del bronzo prosperò il commercio con luoghi lontani, e le grandi potenze dell'epoca erano strettamente legate fra loro tanto economicamente quanto politicamente. La fine repentina di quest'epoca di benessere continua a porre interrogativi irrisolti.



Spektrum Der Wissenschaft /Ernde Grafik

fanno pensare che tutto questo abbia avuto origine in epoca micenea. Nelle parti ancora conservate il muro aveva uno spessore variabile da 4 a 5,7 metri, e in un punto ha un'altezza di 2,5 metri. La conclusione più plausibile è che questa costruzione servisse alla difesa.

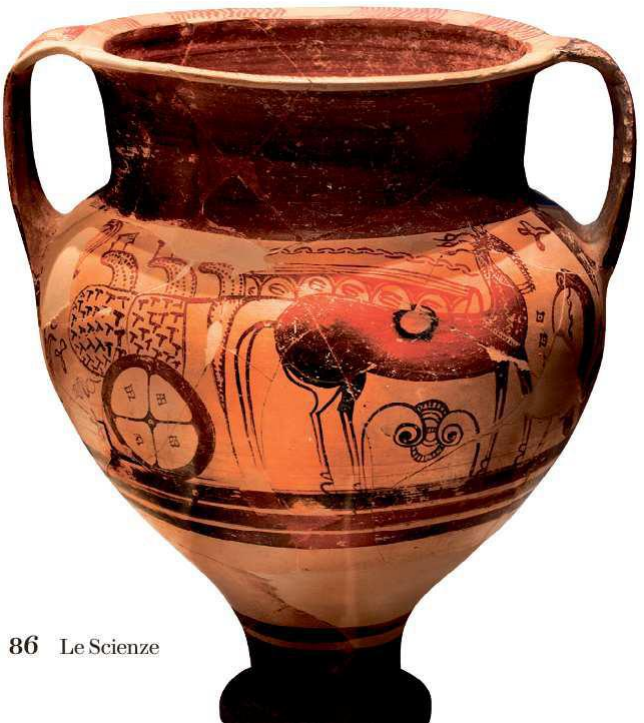
Insicurezza e timore dominavano probabilmente anche a Creta. Alla fine del XIII secolo a.C. le coste erano in gran parte disabitate e gli abitanti si erano spesso ritirati in insediamenti fortificati sulle montagne. Scoscesi dirupi e montagne remote offrivano protezione da nemici che ci si aspettava venissero per mare. Accenni a queste minacce si trovano anche in testi in lineare B provenienti da Pilo, che riferiscono il dispiegamento di truppe incaricate di sorvegliare le coste. Non siamo in grado di dire se questo comportamento fosse normale routine o se venisse ordinato come una misura necessaria in una situazione di pericolo. Nel loro complesso però tutti questi indizi archeologici ed epigrafici suggeriscono che nei palazzi dell'Egeo si considerasse un'invasione dal mare come una concreta possibilità.

Un complesso di indizi suggerisce che nei palazzi dell'Egeo fosse considerata probabile un'invasione dal mare

Circa nello stesso periodo si dissolse anche l'impero ittita. Nell'elenco delle possibili cause troviamo le lotte di potere per il trono e la lotta di varie parti dell'impero per ottenere l'indipendenza, nonché difficoltà economiche e attacchi, per esempio da parte dei nomadi Kaškei. Le scoperte archeologiche ci dicono per esempio che il tempio e gli edifici amministrativi della capitale Khattuša furono abbandonati volontariamente. Il re Šuppiluliuma II (che regnò dal 1215 al 1190 a.C.) lasciò la sua residenza per motivi ignoti, trasferendosi in una località oggi sconosciuta. Gli edifici crollarono, e i luoghi sacri vennero usati come officine e abitazioni. Solo all'inizio del XII secolo a.C. Khattuša fu distrutta violentemente e rimase disabitata fino all'XI secolo a.C.

Secondo la corrispondenza diplomatica fra Šuppiluliuma II e il faraone Merenptah, l'impero ittita fu colpito da una terribile carestia. Gli egizi promisero agli ittiti di fornire loro cereali. Da uno scambio epistolare con lo Stato vassallo di Ugarit si apprende inoltre che l'esercito ittita fu coinvolto in combattimenti davanti all'isola di Cipro; Ugarit cadde poco dopo il 1190 a.C.

Il carro da guerra raffigurato in questo cratere miceneo (1350 a.C. circa) evidenzia l'importanza della forza militare nella tarda Età del bronzo. A fronte, la cosiddetta «maschera di Agamennone», ritrovata a Micene, la cui produzione è fatta risalire al 1500 a.C. circa.



Peter Horree/Alamy Stock Photo

I popoli del mare

Gli aggressori furono chiamati dall'egittologo Gaston Maspero (1846-1916) «popoli del mare» in riferimento a un testo di Ramsete III (che regnò dal 1186 al 1159 a.C.) sui «Popoli delle isole in mezzo al mare». Il faraone elencò su un rilievo del suo tempio funerario a Medinet Habu i nomi dei popoli che aveva sconfitto: Peleset, Tjeker, Šekeleš, Denien e Wešeš. Nello stesso testo dichiarò che questi medesimi popoli erano stati responsabili della caduta dell'impero degli Ittiti, come pure dei piccoli regni di Karkemish, di Arzawa e di Cipro. Già il faraone Merenptah (che regnò dal 1213 al 1203) fornì informazioni su attacchi degli Šekeleš, oltre che su aggressioni degli Shardana, degli Eqweš, dei Tereš e dei Lukka.

Già nell'Ottocento questi etnonimi furono considerati equivalenti ai nomi di popoli antichi noti da altre fonti. Mentre non c'è alcun dubbio sull'identificazione dei Peleset con i biblici Filistei, tutte le altre attribuzioni, come pure gli attacchi loro attribuiti, sono oggetto di contestazioni più o meno decise. Gli Shardana e gli Šekeleš furono situati dagli storici in Sardegna o in Sicilia, i Lukka nella regione dell'Asia Minore della Licia; queste tre identificazioni sono considerate pressoché certe. I Tjeker furono identificati con i Teucri, originariamente stanziati nella Troade, e i Tereš furono identificati con i Tirreni o Etruschi; anche i Wešeš potrebbero essere stati una popolazione dell'Italia: gli Osci della Campania. E quando i Denen o Danuna furono identificati dai filologi con i Danai, e si riconobbero negli Eqweš o Aqaiwaša gli Achei, troviamo due nomi già usati da Omero per popolazioni greche della terraferma appartenenti all'area micenea.

Se queste congetture fossero corrette, l'origine dei popoli del mare dovrebbe essere trovata in Italia; in Grecia dovrebbero poi essersi unite a loro alcune popolazioni locali. Di fatto i ritrovamenti archeologici attestano intensi contatti fra l'area italica e quella ellenica. Ceramiche protomicenee cominciarono a venire alla luce nelle isole Lipari in insediamenti dei secoli XVI e XV a.C. Nel periodo palaziale questa esportazione verso ovest si intensificò. In Italia si cominciò a produrre anche nello stile miceneo, e a partire dalla metà del XIII secolo a.C. prodotti ceramici, utensili e armi cominciarono a fare il viaggio inverso, dall'Italia alla Grecia, dove si cominciarono a produrre in Grecia manufatti in stile italico e mitteleuropeo. Gli esperti suppongono però che manufatti e tecniche non siano stati importati attraverso un commercio con l'estero ma siano stati introdotti in Grecia da viaggiatori rientrati nei loro paesi. D'altra parte tutto questo accadde già prima della caduta dei palazzi micenei, e quindi non può essere una prova che eserciti invasori provenienti dal mondo italico abbiano conquistato il mondo protogreco dandolo alle fiamme.

Crisi economica o disastri naturali?

Negli ultimi tempi voci molto critiche si sono pronunciate contro la tesi che «i popoli del mare abbiano distrutto da soli nel corso dei secoli regni stabili». In una pubblicazione del 2014 Eric Cline, archeologo alla George Washington University di New York ed esperto dell'Età del bronzo nel Mediterraneo orientale, ha ripreso

Hercules Milas/Alamy Stock Photo

la tesi di una situazione economica evidentemente critica, che mise in pericolo le vie commerciali e in particolare l'approvvigionamento dei metalli. Nelle ultime settimane e mesi prima del declino i testi in lineare B registrarono solo pochi chilogrammi di bronzo, ossia quantità relativamente piccole, distribuite alle fucine associate ai palazzi. Una tavoletta di terracotta da Pilo registra che, in conseguenza di questa scarsità di materie prime, per produrre armi furono usati persino recipienti di bronzo per doni votivi sottratti ai templi.

A giudizio dell'archeologo greco Spyros Iakovidis (1923-2013), che ha diretto gli scavi a Micene per oltre cinquant'anni, e di Joseph Maran, docente di preistoria e protostoria dell'Università di Heiselberg e direttore degli scavi a Tirinto, la catastrofe del 1200 a.C sarebbe stata causata da violenti terremoti. L'intera area del Mediterraneo orientale è fortemente minacciata, perché lì si scontrano tre placche tettoniche: quella eurasiatica, quella africana e quella araba. Alcuni siti greci – fra cui Micene, Tirinto e Midea – mostrano chiaramente i danni provocati da scosse sismiche. Nella località di Lachish, oggi in Siria, sono stati trovati addirittura scheletri di varie persone, uccise dalla caduta di grosse pietre. L'intera regione potrebbe essere stata colpita da un terremoto di magnitudo elevata.

Tuttavia la storia delle culture dell'Egeo dimostra che già in precedenza erano accaduti eventi simili, per esempio nella transizione dal periodo minoico protopalaziale a quello neopalaziale, ma i palazzi furono sempre ricostruiti. Per quale motivo dunque questa volta crollò l'intero sistema politico in Grecia, in Asia Minore e nel Vicino Oriente?

Le ricerche paleoclimatologiche indicano che potrebbero aver contribuito anche i cambiamenti climatici. Come hanno dimostrato David Kaniewski, dell'Università di Tolosa, e il suo gruppo di ricerca sulla base di nuclei di boro prelevati dai sedimenti marini di Cipro e della Siria, nel Mediterraneo orientale, in seguito a un raffreddamento globale del clima, tempo prima vi erano state precipitazioni significativamente minori per un periodo più lungo.

Le condizioni per i raccolti agricoli che avevano bisogno di piogge abbondanti peggiorarono a vista d'occhio, e ne seguirono cattivi raccolti. Così i resti di scarti vegetali accumulati intorno al palazzo di Tirinto fanno ipotizzare una crisi agricola nel XIII secolo a.C. I chicchi dei cereali si rimpicciolirono e le erbacce prosperarono nei campi, il che suggerisce all'archeobotanico Helmut Kroll sequenze di cattivi raccolti. Successivamente i terreni agricoli non ebbero il tempo di recuperare: un circolo vizioso.

La siccità ridusse anche i proventi dell'allevamento del bestiame. L'archeobotanica Cornelia Becker, della Libera Università di Berlino, ha anche dimostrato, sulla base di ossa di animali rinvenute nel sito di Kastanas, in Macedonia, che bovini, ovini e caprini della tarda Età del bronzo erano più piccoli che in precedenza, un fatto che con ogni probabilità si può ricondurre alle peggiori condizioni dell'allevamento e del foraggio.

Quindi sono state le variazioni climatiche e i problemi che causarono nell'economia agricola a determinare il declino delle culture dell'Età del bronzo? E gli aggressivi popoli del mare erano in verità emigranti che per evitare la fame cercavano rifugio in paesi stranieri? Non è possibile dare una risposta netta a questa domanda, ma pare comunque improbabile che una singola causa abbia potuto determinare la fine di un'epoca. Le nuove ricerche lasciano piuttosto riconoscere un insieme di fattori, la cui interazione determinò il collasso del complesso sistema dei regni strettamente connessi fra loro della regione del Mediterraneo orientale. ■

PER APPROFONDIRE

Zeit der Helden. Die «dunklen Jahrhunderte» Griechenlands 1200-700 v. Chr. Hattler C. e altri (a cura di), in *Katalog zur Ausstellung im Badischen Landesmuseum Karlsruhe*, 25-10-2008/15-2-2009, Primus, Darmstadt, 2008.

Morti da oppioidi

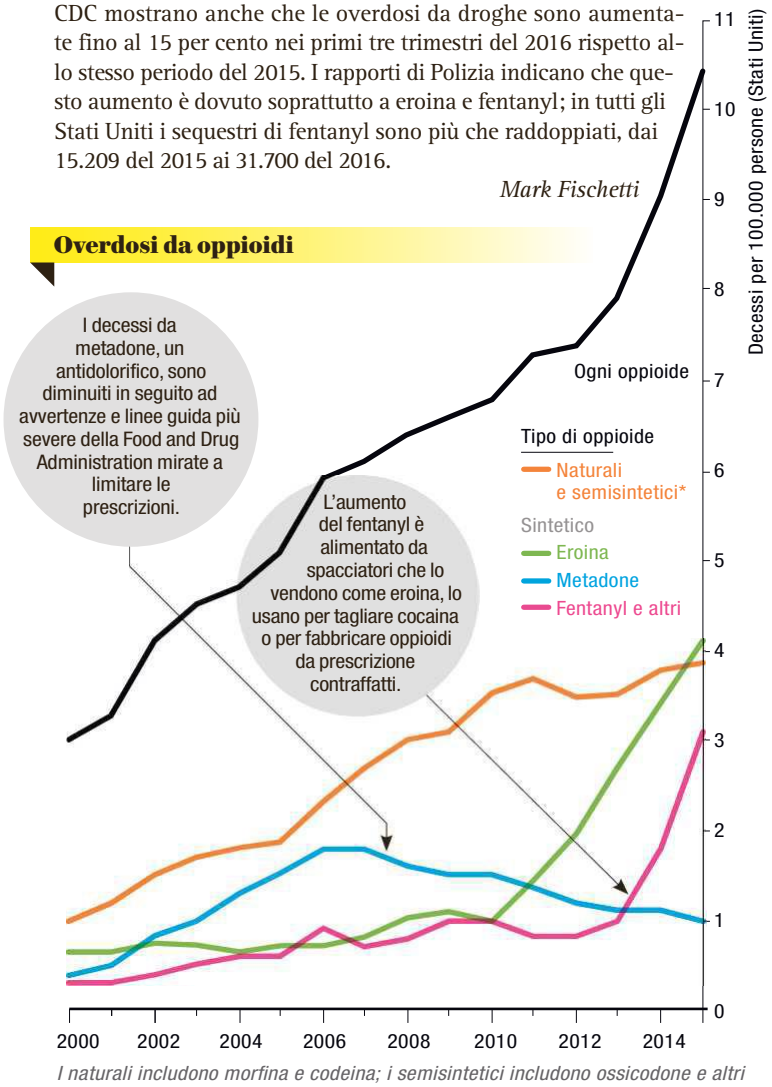
Negli Stati Uniti uomini e donne di ogni età stanno morendo di eroina e fentanyl

Dal 2010, negli Stati Uniti i decessi da overdose di droghe sono aumentati vertiginosamente (*grafico in basso*). Ad agosto, un rapporto di una commissione presidenziale ha descritto questa crisi in termini di vite umane come «un 11 settembre ogni tre settimane». Secondo gli U.S. Centers for Disease Control and Prevention (CDC), questa epidemia di decessi ha due cause principali: un incremento di morti, che dura ormai da 15 anni, dovuto a overdose di oppioidi da prescrizione; un recente aumento di overdosi da eroina e fentanyl, oppioide sintetico usato in farmaci, prodotto illegalmente.

«I tassi sono più elevati tra uomini e donne praticamente in ogni fascia di età e regione del paese (*grafici più piccoli*). I dati dei CDC mostrano anche che le overdosi da droghe sono aumentate fino al 15 per cento nei primi tre trimestri del 2016 rispetto allo stesso periodo del 2015. I rapporti di Polizia indicano che questo aumento è dovuto soprattutto a eroina e fentanyl; in tutti gli Stati Uniti i sequestri di fentanyl sono più che raddoppiati, dai 15.209 del 2015 ai 31.700 del 2016.

Mark Fischetti

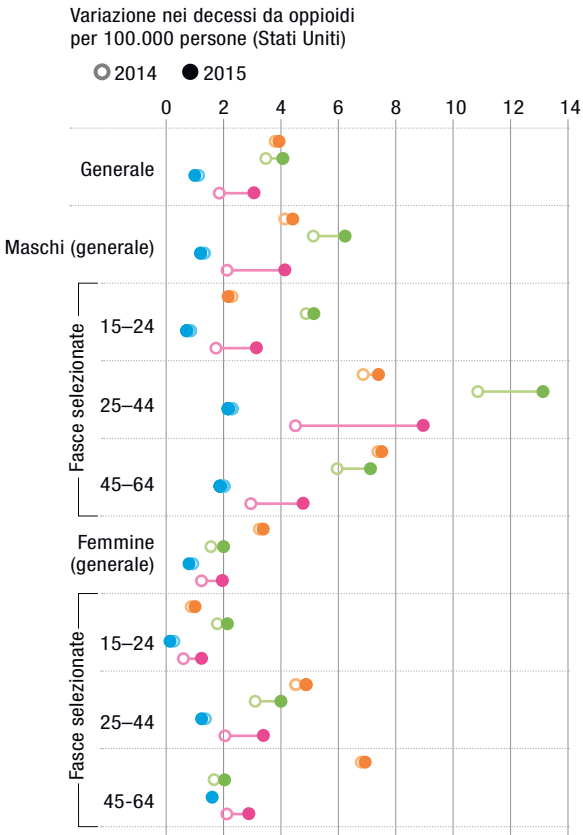
Overdosi da oppioidi



I naturali includono morfina e codeina; i semisintetici includono ossicodone e altri

Minaccia di mezza età

Dal 2014 al 2015 la mortalità da fentanyl ed eroina è aumentata in modo significativo per uomini e donne in tutte le fasce di età (ultimi dati per gli Stati Uniti). La crescita è stata grande soprattutto per le persone nella fascia di età tra i 25 e i 44 anni. Anche nel 2016 queste due droghe hanno spinto in alto i tassi di mortalità per oppioidi, secondo gli Stati che hanno terminato i rispettivi rapporti sul fenomeno; in Massachusetts i decessi sono cresciuti del 17 per cento tra il 2015 e il 2016.



Da est a ovest

I tassi di mortalità stanno aumentando maggiormente nel nord-est. Una ragione per la crescita più lenta a ovest potrebbe essere che solo ora i trafficanti iniziano a spostare la distribuzione di eroina dalla forma *black tar* (eroina nera) a quella in polvere bianca, più facile da tagliare con fentanyl mortale.

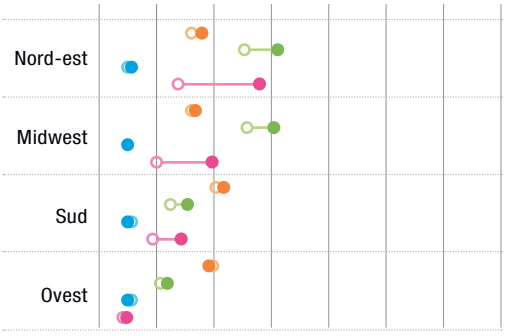


Grafico di Jen Christiansen. Fonti: Division of Unintentional Injury Prevention, National Center for Injury Prevention and Control, Centers for Disease Control and Prevention www.cdc.gov/drugoverdose/data/analysis.html (*grafico con linee*); *Increases in Drug and Opioid-Involved Overdose Deaths-United States, 2010–2015*, di Rose A. Rudd e altri, in «Morbidity and Mortality Weekly Report», Vol. 65, nn. 50–51, 30 dicembre 2016 (*dati demografici disaggregati*).

di Paolo Attivissimo
Giornalista informatico e studioso della disinformazione nei media

Il più grande avvelenatore di sempre

Gli effetti tossici del piombo nella benzina coinvolsero la popolazione globale

Se qualcuno vi chiedesse di nominare l'uomo che più di ogni altro nella storia ha avvelenato persone, probabilmente non vi verrebbe in mente di rispondere citando Thomas Midgley Jr. Eppure su di lui, premiatissimo inventore e chimico, pesano le morti e le malattie di milioni di persone.

Nei primi anni del secolo scorso, Midgley lavorava alla General Motors (GM) alla ricerca di un modo per aumentare l'efficienza dei motori a benzina. Dopo anni di tentativi infruttuosi, nel 1921 scoprì che aggiungere al carburante del piombo tetraetile risolveva il problema.

Si sapeva sin dall'antichità che il piombo era altamente neurotossico (ne parlava Dioscoride, medico dell'esercito di Nerone, e i bambini dell'epoca di Midgley morivano per aver ingerito schegge di vernice al piombo delle proprie culle), e nel settore automobilistico erano già disponibili e in uso delle alternative meno rischiose (per esempio l'etanolo). Ma le alternative non erano brevettabili e quindi avrebbero prodotto pochi profitti, per cui la General Motors decise lo stesso di adottare il piombo tetraetile come additivo antidetonante, dando però ordine di non usare la parola «piombo» nei documenti promozionali. Nacque così la Ethyl Corporation of America.

Le autorità mediche statunitensi, allarmate, chiesero di indagare sui rischi dell'uso diffuso del piombo tetraetile: le indagini furono svolte dal governo, ma sotto il controllo e con il finanziamento e la censura della Ethyl. Nonostante i giornali denunciassero le morti e i frequenti casi di pazzia negli stabilimenti di produzione, diventati «la casa delle farfalle» per via delle allucinazioni indotte dall'avvelenamento da piombo, Midgley e l'azienda minimizzarono: colpa dei lavoratori maldestri e delle alte concentrazioni sul posto di lavoro, dissero. Midgley stesso dimostrò pubblicamente di strofinarsi le mani con il piombo tetraetile senza alcuna conseguenza e asserì che non ci sarebbe stato pericolo per la popolazione.

Siccome a quel punto il piombo tetraetile era diffusamente usato in commercio da oltre due anni senza che fossero emersi danni tra i consumatori, fu deciso, con il consenso delle autorità sanitarie, che in nome del progresso e della competitività non si poteva esitare oltre. Le alternative a questo additivo sparirono in breve dal mercato, con guadagni enormi per GM e le consociate come Standard Oil, che vendettero la loro tecnologia addirittura alla Germania nazista. Per i successivi 35 anni non si parlò più di avvelenamento atmosferico da piombo tetraetile.

Fu solo la ricerca di un geochimico, Clair Patterson, a scoprire involontariamente, negli anni sessanta, che l'intera popolazione mondiale a quel punto era contaminata dal piombo a livelli 600 volte superiori a quelli preindustriali. Patterson fu boicottato e sabotato a lungo, ma alla fine dimostrò di avere ragione. Altri ricercatori dimostrarono il legame fra esposizione al piombo, ritardo mentale neonatale e la crescente violenza sociale. Eravamo tutti nella casa delle farfalle e non lo sapevamo perché non c'era più un termine di paragone di normalità, cancellato da 200.000 tonnellate di piombo scaricate in atmosfera ogni anno. Dagli anni settanta in poi, le leggi, faticosamente, ridussero le emissioni di piombo nei gas di scarico delle auto.

Versione verde. Dagli anni settanta in poi il piombo tetraetile è stato eliminato dalla benzina grazie ad apposite leggi, portando ai carburanti verdi attualmente in commercio.

Midgley non venne mai a sapere di aver avvelenato il mondo: morì nel 1944, strangolato da una sua altra invenzione, un complicato meccanismo a pulegge che aveva creato per alzarsi dal letto dove giaceva afflitto dalla poliomielite. Non seppe mai, soprattutto, di aver avvelenato il pianeta anche una seconda volta: negli anni trenta aveva infatti sintetizzato il Freon, il primo dei clorofluorocarburi che diventeranno responsabili del buco dell'ozono.

Syda Productions/Shutterstock

di Beatrice Mautino
Biotecnologa, giornalista e comunicatrice scientifica. Tra i suoi libri più recenti, l'e-book *Stamina. Una storia sbagliata* (2014) e *Contro natura*, con Dario Bressanini (Rizzoli, 2015)

Un test per la qualunque

I test genetici sono utili e potenti ma non devono essere trattati con leggerezza

"Si sa che la cellulite è il punto debole di qualsiasi donna e può creare dei complessi che se non curati possono portare a gravi conseguenze», si legge sul sito web di un'azienda che vende test genetici per individuare tracce di cellulite nel DNA. No, non parliamo di ciccia o gobbette nei cromosomi, ma di qualcosa, nella sequenza nucleotidica, che differenzi le donne che hanno la cellulite da quelle che non ce l'hanno. «Il test genetico predittivo – prosegue il messaggio pubblicitario – valuta la predisposizione genetica a sviluppare cellulite (da moderata a grave)» che permette al «medico di elaborare un piano, comprendente una terapia e alcuni cambiamenti nello stile di vita, per ridurre il rischio di sviluppare questa condizione». Negli ultimi anni, grazie all'abbassamento dei costi per questi esami, i test genetici per diagnosticare la qualunque stanno spopolando. Che si tratti di scovare nel DNA tracce di invecchiamento precoce o di calvizie, la struttura del messaggio promozionale è sempre la stessa: si lancia un allarme, si individua un nemico rappresentato generalmente da un gene, si propone una soluzione semplice come una crema o un ciclo di trattamenti.

Quasi sempre, questi test una base scientifica ce l'hanno. Nel caso della cellulite, per esempio, il colpevole individuato da questi esami è il gene che codifica per l'enzima convertitore dell'angiotensina (ACE), un ormone che aumenta la pressione sanguigna e stimola la vasocostrizione. «Una paziente che risulta positiva alla variante del gene *ACE* – leggiamo sul sito web dell'azienda che vende il test - ha una probabilità pari a circa il 70 per cento di sviluppare cellulite da moderata a grave; al contrario, una paziente risultata negativa ha una probabilità pari a circa il 50 per cento di non svilupparla.»

Se risaliamo all'origine di questi dati scopriamo elementi interessanti. Nel 2010, infatti, il «Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology» ha pubblicato i risultati di un'indagine svolta da un gruppo di ricerca dell'Università di Pavia nella quale si mostrava che nelle 200 donne con cellulite esaminate era presente una forma mutata del gene *ACE* non presente nelle 200 donne senza cellulite. In particolare, il 50 per cento delle donne senza cellulite è risultata positiva per la variante «incriminata» di *ACE*. Una su due. Nel gruppo delle donne con cellulite, invece, quelle che sono risultate positive per quella variante sono state il 62,3 per cento, due donne su tre. Quindi, se è vero che, stando a questi dati, due donne su tre, fra quelle risultate positive al test, sembra che siano più predisposte a sviluppare forme gravi di cellulite, è anche vero che lo stesso vale per una donna su due di quelle risultate negative. Un messaggio più realistico, ma decisamente meno efficace e convincente di quello usato per la pubblicità dei test, tanto che le percentuali sono state arrotondate per eccesso o difetto a seconda delle esigenze e le parole sono state usate ad arte per esaltare differenze che, nella realtà, non sono poi così distanti.

I test genetici sono uno strumento molto utile, potente e destinato a diventare sempre più presente nella vita di tutti noi. Ma proprio per questo non possono essere trattati con leggerezza. Un medico serio non lascerebbe mai i risultati di un test genetico per individuare la predisposizione a sviluppare un determinato tumore o una malattia neurodegenerativa in mano a un paziente senza accompagnarlo con un'attenta valutazione. Si può obiettare che paragonare malattie serie e «frivolezze» come cellulite non è corretto. È vero, ma i primi a far paragoni impropri sono proprio quegli studi medici che si prestano a usare questo strumento utile e potente per scopi commerciali, sicuramente legittimi, ma di certo non utili a consumatori e pazienti e probabilmente nemmeno molto etici.

pedrojperez/iStock

Insieme a un medico. I test genetici dovrebbero essere accompagnati sempre da un'attenta valutazione medica, anche se riguardano problemi «frivoli» come calvizie o cellulite.

di Dario Bressanini
chimico, divulgatore interessato all'esplorazione scientifica del cibo.
Autore di *Pane e Bugie*, *OGM tra leggende e realtà* e *Le bugie nel carrello*.

Bistecca a rovescio

La cottura giusta per ottenere una carne succulenta all'interno e croccante fuori

A volte compiamo gli stessi gesti in modo automatico da così tanto tempo che di rado ci chiediamo perché li facciamo e se per caso non ci siano alternative migliori o comunque degne di essere esplorate. Prendiamo la cottura della bistecca. Da sempre si prepara cuocendo ad alte temperature entrambi i lati, in padella o alla griglia, cercando allo stesso tempo di far giungere l'interno al grado di cottura desiderato.

Riflettiamo un momento su che cosa vogliamo realmente ottenere quando cuociamo una bistecca di tre centimetri di spessore o più; dalla superficie esterna vogliamo gusto, aroma e sapore: il risultato delle reazioni di Maillard che avvengono solo ad alte temperature e i cui prodotti aromatici hanno il caratteristico colore marrone. L'interno della bistecca invece, che ha assai meno sapore, vogliamo che sia succoso e con la consistenza desiderata. Un risultato che si ottiene quando la temperatura interna rimane tra 50 °C, la cosiddetta cottura al sangue, e 60 °C, la cottura media. A temperature superiori la carne perde il colore rosa e diventa più asciutta.

Se cuciniamo la bistecca alla solita maniera che cosa otteniamo? Una superficie gustosa ma con l'interno non cotto uniformemente. Se al cuore volevamo raggiungere i 50-55 °C, intervallo in cui la carne risulta più succosa, via via che ci spostiamo verso la superficie la carne virerà al grigio perché avrà raggiunto temperature superiori, e non sarà né saporita né succulenta. Il problema è che stiamo cercando con una cottura unica di ottenere due effetti separati, uno superficiale l'altro interno, e in questo modo l'alone grigiastro, più o meno spesso, è inevitabile.

Risultato ottimale. La tecnica del reverse sear rovescia la cottura tradizionale della bistecca, permettendo di cuocere l'interno lentamente e l'esterno in modo rapido.

La soluzione però è semplice: effettuare le due cotture separatamente. Prima cuocere l'interno, lentamente, in modo da avere la temperatura più uniforme possibile, e poi cuocere rapidamente l'esterno. In questo modo si ottiene una cottura interna uniforme e una crosticina asciutta e gustosa. Questa tecnica, chiamata *reverse sear* negli Stati Uniti perché rovescia la cottura tradizionale, è da una decina d'anni sempre più diffusa tra gli appassionati di bistecche per i suoi numerosi vantaggi rispetto alla cottura classica, nonostante si impieghi più tempo.

Esistono molti modi per metterla in pratica. A casa uno dei più semplici è questo: prendete la vostra bistecca e salatela a dovere su entrambi i lati. Se avete sentito dire che non si deve fare perché la carne si secca, beh, non preoccupatevi, è una leggenda dura a morire in Italia. Infilate nella carne la sonda di un termometro e riponetela sulla griglia del forno con una teglia sotto per raccogliere eventuali liquidi. Accendete il forno e regolatelo a 90–100 °C.

Tenete la carne nel forno fino a quando raggiunge cinque gradi in meno della temperatura di servizio che desiderate: se volete una cottura al sangue, 50 °C al cuore, toglietela quando raggiunge i 45 °C. Ci potrà impiegare anche mezz'ora o più, a seconda della temperatura del forno. A questo punto mettetela sulla griglia, oppure ungetela con un olio che regga le alte temperature e cuocetela su una padella caldissima, meglio se di ghisa. Il calore deve essere violento e breve, in modo da produrre una crosticina croccante. Oltre ad avere l'interno cotto in maniera più uniforme, senza rischi di stracuocerlo, la crosticina, che si forma grazie alla reazione di Maillard è molto più pronunciata e gustosa rispetto alla cottura classica perché in forno la superficie si è disidratata e l'acqua è nemica della reazione di Maillard.

È possibile anche abbassare la temperatura del forno, persino a 50 °C, allungando ovviamente i tempi. Ma di solito i forni casalinghi non sono adatti a mantenere temperature così basse. Nel caso ci riusciate avrete un terzo vantaggio: per tutto il tempo in cui la carne rimarrà sotto i 50 °C, si attiveranno al suo interno enzimi, gli stessi che agiscono durante la frollatura, che la ammorbidiranno ulteriormente.

4kodiak/iStock

di Rodolfo Clerico, Piero Fabbri e Francesca Ortenzio

Accrocchi inappendibili

«Inaccrochable.»

Non è una parola che si sente tutti i giorni, quantomeno tra le Alpi e il Lilibeo. Anzi, a voler essere onesti, non si sente quasi mai: e anche a volerla leggere, è palese che la gran parte degli italofoni la guarderà con occhi grifagni, perplessi e dubbiosi: non solo perché probabilmente non ne conosce il significato, ma anche per il dubbio ancora più primitivo e letale: sarà inglese o francese, questa roba?

Certo, non vale proprio per tutti: per esempio, se avete la barba, fumate la pipa e vi dilettate di matematica, è probabile che vi piaccia anche Hemingway e la lingua francese; perlomeno, è quanto capita al proprietario della pipa e della barba che frequenta queste pagine, il GC. Stanti così le cose, è inevitabile che un termine come «*inaccrochable*» sia più che noto anche ai suoi poveri coinquilini: svariate decine di volte Alice e Doc hanno dovuto sorbirsi la storia di quando Gertrude Stein liquidò proprio con quell'aggettivo *Su nel Michigan* di Ernest Hemingway (che peraltro non si lasciò smontare dal giudizio e procedette comunque a pubblicarlo assieme agli altri 48 racconti).

Resta il fatto che la parola in questione è densa di storia e di significati: il fatto che sia parte di un dialogo fra due statunitensi dovrebbe risolvere subito il dubbio angoscioso se si tratti di termine inglese o francese, ma questo è ovviamente falso, perché la Stein, vivendo quasi tutta la vita in Francia, probabilmente si sentiva più a suo agio con il francese. Senza contare che la signora mescolava non solo le lingue, ma anche gli interessi: altrimenti, perché mai definire «impossibile da appendere» un racconto, se non per ribadire che un'opera d'arte – di qualunque arte – è comunque qualcosa che deve essere esposto, mostrato, «appeso», e se non poteva esserlo allora non era arte?

Certo, se a modulare il pentasillabo non è la Stein ma Alice, è possibile che il significato sia meno metaforico è più pragmatico, più letterale: insomma, che qualcosa che vorrebbe essere appeso si può tranquillamente scordare il pio desiderio. E se per affermare l'insindacabile giudizio la dottoressa Riddle ha scelto di usare un vocabolo anglo-francese, anziché uno (per lei più familiare) germanico, è verosimilmente solo perché «inaccrochable» ricorda meglio l'italico e vernacolare termine «accrocchio», con tutte le connotazioni negative del caso.

«Treccia, cerca di essere comprensiva. Si tratta di un tentativo di manufatto, io e Doc siamo ancora in fase di studio...», miagola Rudy, nel tentativo di sciogliere il ghiaccio dello sguardo di Alice.

«Ecco, credo la parola "manufatto", a prescindere dalla sua eccessiva vicinanza con la parola "mano", solitamente guidata da un cervello, sia decisamente inadatta. Al massimo posso concedere l'accezione lovecraftiana, di "manufatto alieno, con geometrie intersecantesi ad angoli impossibili", cosa che rafforza il mio giudizio e il mio veto.»

«Adesso non esagerare. La sua geometria, anche se piuttosto irregolare, persiste nell'essere euclidea.»

« "..piuttosto irregolare", GC? Mi trovi una regolarità, in quell'obbrobrio pseudo-geometrico? Se collegassero una dinamo a Euclide, avremmo energia pulita sino alla fine dell'universo, grazie ai suoi rivoltamenti nella tomba!»

Illustrazione di Stefano Fabbri

«Guarda bene – insiste Rudy – in ogni vertice, si incontrano tre e solo tre spigoli, per esempio. E non è un tetraedro.»

«Sei tu che mi sembri piuttosto tetraedrico, anzi, proprio tetragono, a dire il vero. Che cosa non ti è chiaro nella frase "Non-lo-voglio-in-casa"?»

Durante lo scambio di meditate argomentazioni sul valore artistico dell'oggetto, Doc aveva cercato di ottenere un miagolio di approvazione da Gaetanagnesi, nella speranza che la micia potesse apprezzarlo almeno come tiragraffi; le vibrisse tese e rigide del felino mostravano che non aveva avuto il minimo successo.

«Non prendertela, Capo... ti ricordi le regole di convivenza che abbiamo ratificato, anni fa? Per quanto riguarda l'arredamento e

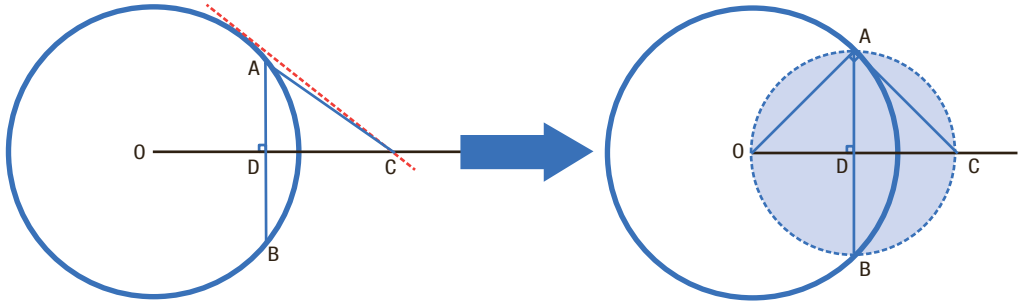
La soluzione del problema esposto in queste pagine sarà pubblicata in forma breve sul numero di novembre e in forma estesa sul sito: www.lescienze.it. Potete mandare le vostre risposte all'indirizzo e-mail: rudi@lescienze.it.

Un oggetto di arredo irrita Alice al punto che vorrebbe portarlo in discarica, mentre stimola Rudy a ideare un gioco

IL PROBLEMA DI SETTEMBRE

Il mese scorso trattavamo due problemi geometrici. Per quanto riguarda il «problema di Doc», si vede facilmente che le due aree sono uguali: portando i vertici del quadrato piccolo nei quattro punti di tangenza del cerchio con il quadrato grande e tracciando le due diagonali del quadrato piccolo, si ottengono quattro quadrati ciascuno dei quali è bisecato dai lati del triangolo: quindi le due aree sono uguali.

Per il secondo problema, a cui fa riferimento la figura, il punto «più distante» (C) dell'arco di cerchio ACB è situato sulla retta passante per il centro O del cerchio e per il punto medio della corda AB. Nel triangolo rettangolo ACD il modo per allontanare il più possibile il punto «più distante» è quello di far sì che la congiungente AC giaccia sulla tangente al cerchio grande (*tratteggiata in figura*). Ma a questo punto la congiungente AC avrà la stessa lunghezza del raggio OA, e così il triangolo OAC formato da questi due segmenti e da AC sarà isoscele e rettangolo. La corda cercata AB sarà pertanto data dall'altezza/cateto del triangolo AOD prolungata fino a intercettare il cerchio in B.



il decoro degli spazi comuni, io e te abbiamo il 24,5 per cento a testa del potere decisionale, Gaetanagnesi il 2 per cento e Alice il 49 per cento residuo. Mi predispongo a trasportare la nostra opera d'arte nella più vicina discarica?»

Alice si china a raccogliere Gaetanagnesi, che risponde con una sobria modulazione di fusa, e se la mette in grembo dopo essersi sistemata sul divano: «Proporrei una discarica non troppo vicina, per sicurezza... non avrete mica paura che qualcuno tenti di attribuirsi la paternità di quest'obbrobrio? Ma no, sono sicura di no... non trovo tracce di firme autoriali: sotto sotto, i vostri subconsci devono aver riconosciuto che era meglio non lasciare prove del vile attentato agli dei dell'estetica...»

«Treccia, sei un genio!», dichiara Rudy, quasi lasciandosi cadere la pipa di bocca.

«Oh, lo so. Ma com'è che te ne sei reso conto?»

«Lasciacelo ancora per qualche minuto, d'accordo? Ho in mente una cosa interessante...»

«Solo se posso far partire il cronometro, e a patto che il tuo "qualche" corrisponda a un intero minore di dieci. Che cosa hai intenzione di fare?»

«Un gioco, con le firme. Abbiamo questo "qualcosaedro"...»

«Nome quantomeno azzeccato, a parte il finale: "...edro" per me ha sempre implicato una struttura soggiacente di regolarità.»

«...guarda che se continui a interrompermi i minuti durano di più. Allora, grazie a due pennarelli indelebili, adesso io e Doc cominciamo a giocare....»

«...perché sempre io? Non puoi sfidare Treccia, una volta tanto?»

«Per il semplice motivo che, pur di liberarsi del qualcosaedro, sarebbe disposta a dichiarare la partita persa alla zeresima mossa. Allora, uno di noi firma una faccia del... coso, poi tocca all'altro firmare un'altra faccia, e avanti così. Vince chi riesce ad avere la propria firma su tre facce concorrenti in un unico vertice.»

«Non lo definirei "interessante" per due motivi», commenta Alice: «Tanto per cominciare coinvolge quell'abominazione cosmica, e inoltre, conoscendoti, sono sicuro che uno dei due giocatori abbia comunque una strategia vincente. Quindi, Doc, perderai comunque.»

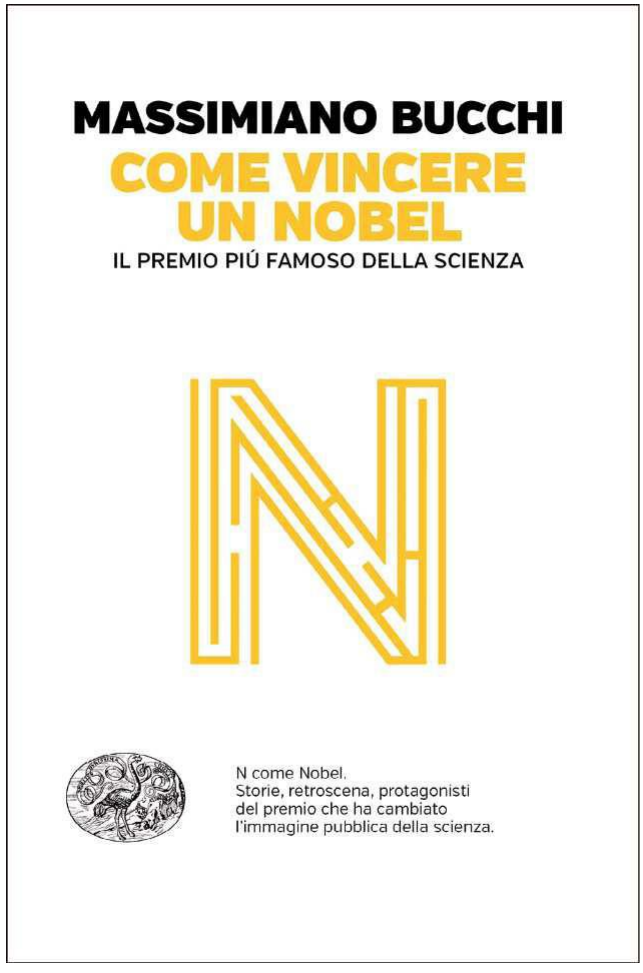
«Come se fosse una novità... ma dopo un po' imparo, magari riesco a vincere una o due sfide.»

«Guarda che abbiamo parlato di pennarelli "indelebili"», rimarca Alice, con una punta di preoccupazione nella voce: «Una volta scarabocchiate le vostre firme, non potrete certo riusarlo per una rivincita...»

«Certo che no, ovvio. Ma quelli che abbiamo di là, nell'altra stanza. Tutti irregolari, diversi uno dall'altro, e sempre con tre spigoli che si incontrano in ogni vertice. E nessuno tetraedrico. Non li hai visti?».

La ricetta per il premio più ambito

Come vincere un Nobel
di Massimiano Bucchi
Einaudi, Torino, 2017, pp. 248, (euro 17,50)



«Per punirmi del mio disprezzo per l'autorità, il destino ha fatto di me stesso un'autorità.» Così ironizzava sulla propria condizione di celebrità scientifica Albert Einstein, premio Nobel per la fisica nel 1921. Un riconoscimento assegnato dopo una lunga sequela di candidature, non per la formulazione della teoria della relatività, ma per la spiegazione dell'effetto fotoelettrico. E per essere certi di evitare fraintendimenti, una singolare avvertenza nel diploma specificava «indipendentemente dal valore che (dopo eventuale conferma) possa essere attribuito alla teoria della relatività e della gravitazione». Un esempio celeberrimo di come l'Accademia reale delle scienze di Svezia possa venire condizionata, anche di fronte a rivoluzioni scientifiche ormai acclarate, da valutazioni di eccessiva cautela oppure da questioni di opportunità politica, visto che già in quegli anni in Germania la figura di Einstein e la teoria della relatività suscitavano reazioni controverse, e gli scienziati svedesi tenevano ai buoni rapporti con i colleghi tedeschi.

E sono molte le vicissitudini attraversate in più di un secolo dal premio scientifico più noto a livello globale, a cominciare dalla sua faticosa genesi dall'inaspettato lascito testamentario dello schivo industriale svedese Alfred Nobel, che non voleva essere ricordato solo per l'invenzione della dinamite. Un premio in sintonia con lo spirito dei tempi, internazionalista e idealista, celebrato dalle Olimpiadi e dalle Esposizioni universali, che però ben presto deve far fronte a polemiche, come quella seguita all'assegnazione del Nobel per la chimica del 1918 al tedesco Fritz Haber, che aveva giocato un ruolo cruciale nella decisione di impiegare i gas tossici durante la prima guerra mondiale.

Controversie e polemiche attraversano tutta la storia del premio: uno dei casi più recenti è quello del medico Raymond Davadian, che ha acquistato intere paginate dei principali quotidiani statunitensi per contestare l'assegnazione del Nobel per la medicina nel 2003. Meno clamore hanno destato i casi di premiati che hanno beneficiato di quello che Massimiano Bucchi, professore di scienza, tecnologia e società all'Università di Trento, definisce «effetto Ringo Starr»: scienziati come Maurice Wilkins, premiato insieme alla celebre coppia Watson e Crick, che hanno avuto per lo più il merito di trovarsi al momento giusto nel posto giusto.

Bucchi coniuga con efficacia aneddoti intriganti, analisi sociologica e ricostruzione storica, corroborati da dati e statistiche, componendo un ritratto critico di quello che il premio Nobel ha rappresentato dal 1901, anno dell'assegnazione dei primi premi, e della sua evoluzione fino ai giorni nostri. Il gioco col lettore che sia curioso di conoscere i segreti per vincere un Nobel è lo spunto per scoprire il peso della nazionalità, del vantaggio di lavorare al fianco di un premiato, ma anche delle storie di *outsider* che ce l'hanno fatta, come Frederick Banting, che in tre anni passò da sconosciuto medico di provincia agli onori di Stoccolma per la scoperta dell'insulina. E naturalmente le storie dei grandi esclusi, per esempio scienziate come Lise Meitner o Jocelyn Bell. Le storie delle (poche) donne premiate avrebbe forse meritato più spazio.

«Se è verde e si muove, è biologia. Se puzza, è chimica. Se non funziona, è fisica.» Fosse semplice come in questa nota battuta di Arthur Bloch circoscrivere le aree di competenza delle diverse discipline scientifiche, i membri dell'Accademia si sarebbero risparmiati faticosi negoziati per arrivare all'assegnazione dei premi, come nel caso di Watson e Crick, due fisici, nominati più volte per la chimica, ai quali nel 1962 fu infine riconosciuto il Nobel per la medicina. Anche grazie a un lavoro di ricerca negli archivi dell'Accademia reale delle scienze di Svezia, Bucchi ha ricostruito nel dettaglio le dinamiche di scelte nate da faticosi compromessi, fonti di controversie, e in qualche (raro) caso di clamorosi errori. Non solo colmando un vuoto di conoscenza per il pubblico italiano, ma anche sollecitando utili riflessioni, nella parte finale, sulla percezione pubblica dello scienziato che anche grazie al Nobel si è andata costruendo nel corso dell'ultimo secolo, oscillando tra genio, eroe nazionale o vero e proprio santo laico.

Marco Motta

Scienziati impegnati per un mondo pacifico

Fisica per la pace
Pietro Greco (a cura di)
Carocci Editore, Roma, 2017
pp. 210 (euro 21,00)

Sottile è la linea tra il bene e il male, anche per gli uomini di scienza. Lo sanno bene gli scienziati che parteciparono al Progetto Manhattan, la mastodontica impresa scientifico-militare che portò gli Stati Uniti a ottenere, primi al mondo, ordigni nucleari poi sganciati ad agosto 1945 su Hiroshima e Nagasaki. Proprio le notizie sugli effetti devastanti delle bombe atomiche usate per colpire le due città giapponesi – decine e decina di migliaia di morti in un batter d'occhio, sofferenze inenarrabili per i sopravvissuti – convinsero molti protagonisti del Progetto Manhattan a schierarsi per la pace e il disarmo. Quell'impegno continua ancora oggi, come illustra il libro curato dal giornalista Pietro Greco, che ripercorre le varie iniziative di impegno civile degli scienziati, di cui molte hanno come protagonisti ricercatori italiani.

Per ragioni storiche, la comunità dei fisici ha raggiunto per prima una massa critica e annovera tra le proprie fila il pioniere del rapporto tra scienza e pace: Albert Einstein. Allo scoppio della prima guerra mondiale il fisico tedesco scrisse un appello agli europei per fermare il conflitto. In seguito lo spirito della proposta einsteniana porterà a progetti che si svilupperanno anche in ambiti diversi dalla fisica, per esempio nel contrasto alle armi chimiche e batteriologiche, oppure che riguarderanno ricerca di base e applicata, dal CERN a SESAME all'Agenzia spaziale europea. Fino al Nobel per la pace del 1995 all'associazione Pugwash e a Joseph Rotblat, il fisico che nel 1943 abbandonò il Progetto Manhattan perché i nazisti erano ormai stati sconfitti e quindi non era necessario arrivare alla bomba atomica mettendo l'umanità in pericolo.

Giovanni Spataro

Un pianeta sempre più caldo alimenta migrazioni e conflitti

Vittorio Zunino Celotto/AGF

Effetto serra, effetto guerra
di Grammenos Mastrojeni e Antonello Pasini
Chiarelettere, Milano, 2017,
pp. 176 (euro 15,00; epub euro 9,99)

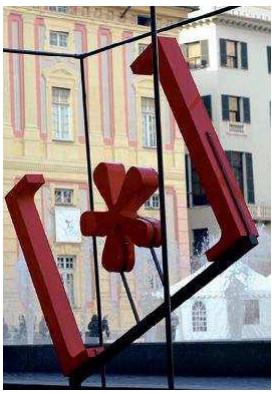
Questo libro non poteva uscire in un momento più adatto. Spaziando tra fenomeni fisici, ambientali e sociali, un climatologo, Antonello Pasini, e un diplomatico, Grammenos Mastrojeni, mostrano con chiarezza come il clima che cambia esaspera la competizione per le risorse e tutto ciò che ne scaturisce, dai conflitti alle migrazioni forzate. ßLo sguardo è a tutto campo, ma un occhio di riguardo va all'Africa, per la sua vulnerabilità e per la sua vicinanza. Due terzi delle terre africane sono già degradate. Metà dei combattenti di Boko Haram si è arruolata per mancanza di alternative economiche. E nel Sahel c'è una chiara coincidenza tra desertificazione, disordini per il cibo, conflitti, terrorismo, traffici illeciti. E, difficile meravigliarsene, migrazioni per l'Italia.

Che cosa c'entra il clima con tutto ciò? Parecchio, dicono varie ricerche. Degrado del suolo, carestie e via dicendo non scatenano per forza guerre, ma le favoriscono se colpiscono società già fragili. Lo mostrano per esempio studi quantitativi e controllati che confrontano paesi soggetti o meno a certi fenomeni climatici e a certe fragilità intrinseche. Erigere muri, e chiudere un occhio sugli abusi dei regimi che fermano i profughi, difficilmente ci aiuterà a lungo. Non quindi per giustizia o spirito umanitario, ma anche solo per mera convenienza, nell'affrontare il cambiamento climatico ogni società ricca – oltre a curare mitigazione e adattamento – dovrà anche proiettarsi, ossia considerarne le conseguenze fuori dal proprio territorio. Le ricette non mancano, alcune persino economiche. L'Italia in realtà lo sta già facendo, per esempio nella cooperazione con le piccole isole, un caso scuola per le sfide future. C'è da sperare che duri. E che diventi questo il senso dell'aiutarli a casa loro.

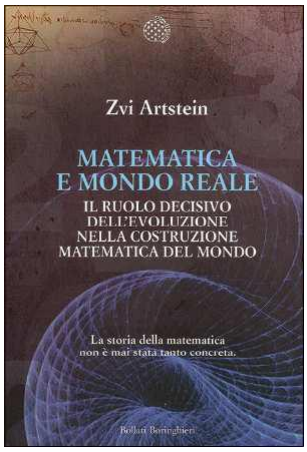
Giovanni Sabato

Tutte, o quasi, le declinazioni del contatto

Dal 26 ottobre al 5 novembre nuova edizione del Festival della Scienza di Genova. Il tema di quest'anno è «contatti», termine che verrà declinato in vari ambiti delle ricerca scientifica, per esempio i contatti tra particelle elementari e strumenti per la loro rilevazione, e del rapporto tra scienza e società. Ecco dunque il filo rosso del ricco programma dell'evento genovese, appuntamento di lunga data e tra i più noti per la comunicazione delle scienza in Italia, con incontri, mostre, spettacoli e laboratori, pure per i più piccoli, grazie a cui conoscere, toccare e vedere aspetti della ricerca, oltre a poter dialogare con scienziati, anche di fama mondiale, su temi attuali.



I vaccini saranno l'argomento della conferenza inaugurale tenuta dal medico Roberto Burioni. La giornalista Anna Meldolesi e il filosofo della scienza Telmo Pievani dialogheranno sulle implicazioni scientifiche ed etiche di CRISPR, la tecnica di editing genomico che sta rivoluzionando genetica e biomedicina. Spazio anche ai contatti declinati nei fenomeni migratori con l'antropologo Marco Aime e il sociologo Maurizio Ambrosini. Per una lista completa di ospiti e appuntamenti: http://www.festivalscienza.it. (*cb*)



Matematica e mondo reale
di Zvi Artstein
Bollati Boringhieri, Torino, 2017,
pp. 380 (euro 32,00)

Una storia della matematica secondo l'evoluzione darwiniana

Molte parole hanno diverse sfumature di significato: «evoluzione», per esempio, secondo il dizionario indica una «trasformazione lenta e graduale», ed è applicabile virtualmente a qualsiasi entità che non sia per propria natura fissa e statica: dalla filosofia teoretica alla tecnica di coltivazione dei ravanelli. Non è pertanto certo sorprendente trovare libri che affrontino il tema dell'evoluzione della matematica, disciplina tra le più antiche e dinamiche. Ma nei contesti scientifici la parola «evoluzione» è spesso usata come sinonimo di «teoria dell'evoluzione di Charles Darwin», e imbattersi in un libro che intende inquadrare la storia della matematica proprio in questo senso è insolito. Lo ha fatto Zvi Artstein, docente di matematica al Weizmann Institute di Rehovot, in Israele in un libro, nel cui sottotitolo («Il ruolo decisivo dell'evoluzione nella costruzione matematica del mondo») la parola «evoluzione» deve intendersi in termini puramente darwiniani.

L'approccio farà arricciare il naso ai biologi: la matematica non è un essere vivente, e anche se ha certo dei geni (nel senso di personaggi genialmente dotati) è altrettanto certamente sprovvista del corredo genetico proprio degli esseri viventi che è il perimetro indispensabile in cui la teoria dell'evoluzione può esercitare il suolo ruolo cruciale.

Ciononostante Artstein procede nell'esporre l'evoluzione della matematica e la sua crescente presenza nel mondo reale (non solo in quello ideale e platonico, dove è spesso relegata) proprio su principi biologici, quali la sopravvivenza del più adatto. L'autore indugia perfino sugli esempi più critici, dal punto di vista evolutivo, dell'utilità di alcuni fondamenti della matematica: la tendenza alla generalizzazione, l'indagine dell'infinito, danno realmente qualche vantaggio quando ci si trova di fronte una tigre? In quel frangente sarà saggio chiedersi se si tratta di un comportamento proprio di «tutte le tigri», o magari indugiare sulla possibilità o meno di esistenza di «infinite tigri»?

Non è un compito facile, questo che l'autore espone nel capitolo iniziale dell'opera e che si propone di dimostrare nei capitoli successivi: esamina le diverse visioni della matematica nei periodi della storia, per arrivare fino a temi contemporanei quali le relazioni tra la matematica del comportamento umano e quello dei computer, la natura della ricerca matematica e la difficoltà di apprendimento.

Dimostrata o meno che sia, la tesi è comunque un ottimo pretesto per ripercorrere la storia della matematica e la sua (nel senso meno impegnativo del termine) evoluzione.

Piero Fabbri

Viaggiare nello spazio
di Marcello Coradini
il Mulino, Bologna, 2017
pp. 160 (euro 11,00)

Scienza, economia e politica della corsa allo spazio

Quando si parla di esplorazione dello spazio, a molti vengono in mente le immagini che nel corso degli ultimi decenni ci sono state inviate dalle sonde interplanetarie o le gesta – per certi versi eroiche – dei pochi esseri umani, dodici in tutto, che hanno posato i loro piedi sulla Luna e che sono, a oggi, gli unici ad aver camminato su un suolo diverso da quello terrestre. In effetti sono tante le pubblicazioni, ricche di illustrazioni, che raccontano l'epopea della conquista dello spazio o le incredibili scoperte scientifiche che questa conquista ha permesso, dimenticandosi però di raccontare i diversi altri aspetti che l'esplorazione spaziale porta con sé, dal lavoro di persuasione delle agenzie spaziali per ottenere i finanziamenti dai politici di turno, fino ai colpi di scena, raramente fortunati, o agli abbandoni in corso d'opera di un progetto apparentemente fallimentare per imboccare la strada di uno ancora più complesso e costoso.

È in particolare a questi retroscena politici ed economici, al lavoro dietro le quinte di tecnici e amministratori, agli imprevisti e ai frequenti cambi di programma che è dedicato il libro di Marcello Coradini, il cui sottotitolo spiega bene il senso di questa opera: «Non solo scienza ma anche economia e progresso». Un libro scritto in certi passaggi in prima persona, poiché che l'autore è stato per molti anni coinvolto nella progettazione e nella gestione di importanti missioni nel ruolo di coordinatore delle missioni nel sistema solare per l'Agenzia spaziale europea (ESA): missioni come Cassini-Huygens, che ha appena concluso la sua carriera ventennale di esplorazione di Saturno, Venus Express, volta all'osservazione di Venere, e Rosetta, per lo studio delle comete.

Coradini parte dalle motivazioni che hanno spinto l'essere umano, sin dai primordi della sua presenza sul pianeta, a spostarsi dal luogo in cui si trovava per esplorare e scoprire nuove terre, e con esse, nuove risorse e nuove conoscenze. Ecco quindi che l'autore racconta dei grandi esploratori del passato per arrivare ai pionieri del volo spaziale, di cui cita aspetti poco noti al grande pubblico, e all'avvincente lotta per la conquista dello spazio fra Stati Uniti e Unione Sovietica, per poi proseguire in un'approfondita rassegna di successi e fallimenti di missioni e delle motivazioni all'origine degli uni e degli altri. *Viaggiare nello spazio* è un libro che offre al lettore una nuova prospettiva – più umana, potremmo dire – su questa grande avventura iniziata appena sessant'anni fa con il lancio dello Sputnik 1 da parte dell'allora Unione Sovietica e ancora tutta da scrivere.

Emiliano Ricci

I temi caldi della ricerca a Bergamo

Dall'intelligenza artificiale all'economia circolare, BergamoScienza trasformerà la città per due settimane in un grande science center aperto a tutti

In 15 anni di attività, BergamoScienza ha attratto più di 1 milione di curiosi che si sono riversati in città per gli incontri con i premi Nobel (ben 23 in tutto), le conferenze degli esperti di tutti i settori della scienza, i laboratori animati dai volontari e i grandi spettacoli che la manifestazione è sempre riuscita a portare in Italia. Non fa eccezione l'edizione 2017, che per due settimane trasforma Bergamo in un grande *science center* aperto a tutti.

Ospite d'onore è il Nobel Mario Capecchi, uno degli ideatori del *gene targeting*, tecnica fondamentale per studiare le mutazioni legate a malattie come cancro e diabete, ma anche personaggio dalla vita avventurosa, a partire dalla fuga prematura da una Verona sotto le bombe della seconda guerra mondiale quando era bambino. Capecchi sarà a Bergamo il 13 ottobre, un giorno prima dell'altro grande nome internazionale, questa volta proveniente dall'arte, Pat Metheny, che sarà accompagnato da una band di assoluto livello, con la presenza anche del batterista Antonio Sanchez, autore della colonna sonora di un grande film degli ultimi anni: *Birdman*.

Ma prima di questa grande doppietta dell'ultimo weekend del festival, non mancheranno le occasioni per sbirciare tra le ultime novità in diversi ambiti. A cominciare dall'incontro con Matthew Greenhouse del Goddard Space Flight Center della NASA, che racconterà il suo lavoro al James Webb Space Telescope che andrà in orbita tra un anno portandosi sulle spalle l'ingombrante eredità del telescopio spaziale Hubble. Tre gli appuntamenti di spicco sull'intelligenza artificiale (IA), tema sempre più al centro anche delle cronache generaliste. Rob Fergus della New York University tratteggerà lo stato dell'arte tra limiti attuali e sfide future; Luciano Floridi dell'Oxford Internet Institute esplorerà i risvolti etici, Pier Luca Lanzi del Politecnico di Milano analizzerà il rapporto tra IA e videogiochi.

Ci sarà anche l'occasione di approfondire temi caldi come l'economia circolare e il riciclo dei rifiuti, le conseguenze dei disastri ambientali come Fukushima o il futuro del cibo in parallelo al G7 dell'agricoltura che si terrà a Bergamo il 14 e il 15 ottobre. Scuole sempre protagoniste, con 58 istituti che presenteranno i propri progetti, ma potremmo anche farci accompagnare dentro al corpo umano con speciali guide under 5! Si sa che con la scienza l'imprevisto è dietro l'angolo.

Marco Boscolo

BERGAMOSCIENZA

Dove & quando:

BergamoScienza
dal 30 settembre al 15 ottobre
www.bergamoscienza.it.

Da quindici anni.
In alto, immagini da alcune edizioni precedenti di BergamoScienza, festival con ormai 15 anni di attività e che quest'anno avrà luogo in coincidenza con il G7 dell'agricoltura.

Cortesia Laura Pietra (*due foto in alto*); cortesia BergamoScienza (*logo*)

Numero speciale Non solo una questione di donne

Ariel Skelley/Getty Images

Un intero numero di «Le Scienze» dedicato alla condizione delle donne e alle questioni di genere? La scelta di un argomento del genere potrebbe sorprendere molti lettori, convinti magari che non ci sia nulla di nuovo da dire in proposito o che il tema non c'entri con la divulgazione scientifica. Ma sono proprio i dati e le ricerche più recenti che stanno gettando una luce nuova e diversa sulla condizione femminile, delineando un quadro in cui agli indubbi progressi si affiancano enormi, e spesso incomprensibili, ritardi. Un quadro che il prossimo numero della rivista cercherà di raccontare in una serie di articoli che spaziano dai problemi dell'istruzione delle bambine e della presenza delle donne nel mondo della ricerca a ciò che di nuovo hanno scoperto biologia e neuroscienze su sesso e genere, senza dimenticare salute e accesso al lavoro. Dimostrando così, con il rigore di numeri e dati, che la «questione femminile» non riguarda soltanto le donne, ma è un fattore decisivo per arrivare a costruire un futuro migliore per tutti.

LE SCIENZE S.p.A.

Sede legale: Via Cristoforo Colombo 90, 00147 ROMA.

Redazione: tel. 06 49823181
Via Cristoforo Colombo 90, 00147 Roma
e-mail: redazione@lescienze.it
www.lescienze.it

Direttore responsabile
Marco Cattaneo

Redazione
Claudia Di Giorgio (*caporedattore*), Giovanna Salvini (*caposervizio grafico*), Andrea Mattone (*grafico*), Cinzia Sgheri, Giovanni Spataro

Collaborazione redazionale
Folco Claudi, Gianbruno Guerrerio
Segreteria di redazione: Lucia Realacci
Progetto grafico: Giovanna Salvini

Referente per la pubblicità
A. Manzoni & C. S.p.A.
agente Daria Orsi (tel. 02 57494475, 345 4415852)
e-mail dorsi@manzoni.it

Pubblicità:
A. Manzoni & C. S.p.A.
Via Nervesa 21, 20139, Milano, telefono: (02) 574941

Stampa
Puntoweb, Via Variante di Cancelliera, snc, 00040 Ariccia (RM).

Consiglio di amministrazione
Corrado Corradi (presidente), Michael Keith Florek (vice presidente), Gabriele Acquistapace, Markus Bossle, Stefano Mignanego

Responsabile del trattamento dati (D. lgs. 30 giugno 2003 n.196):
Marco Cattaneo

Registrazione del Tribunale di Milano n. 48/70 del 5 febbraio 1970.

Rivista mensile, pubblicata da Le Scienze S.p.A.
Printed in Italy - settembre 2017

Copyright © 2017 by Le Scienze S.p.A.
ISSN 2499-0590

Tutti i diritti sono riservati.
Nessuna parte della rivista può essere riprodotta, rielaborata o diffusa senza autorizzazione scritta dell'editore. Si collabora alla rivista solo su invito e non si accettano articoli non richiesti.

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in Chief and Senior Vice President
Mariette DiChristina

President
Dean Sanderson

Executive Vice President
Michael Florek

Hanno collaborato a questo numero
Per le traduzioni: Francesca Bernardis: *Costruire un raccolto migliore;* Paolo Cocco: *Sorgenti di vita*; Alessandro Conflitti: *Requiem per la vaquita*; Elisa Dalgo: *Operazione diabete*; Silvio Ferraresi*: Dialoghi con se stessi;* Libero Sosio: *Collasso di culture;* Alfredo Tutino: *Nostro cugino Neo*.

Notizie, manoscritti, fotografie, e altri materiali redazionali inviati spontaneamente al giornale non verranno restituiti.

In conformità alle disposizioni contenute nell'articolo 2 comma 2 del «Codice Deontologico relativo al trattamento dei dati personali nell'esercizio dell'attività giornalistica ai sensi dell'Allegato A del Codice in materia di protezione dei dati personali ex d.lgs. 30 giugno 2003 n.196», Le Scienze S.p.A. rende noto che presso la sede di Via Cristoforo Colombo, 90, 00147, Roma esistono banche dati di uso redazionale. Per completezza, si precisa che l'interessato, ai fini dell'esercizio dei diritti riconosciuti dall'articolo 7 e seguenti del d.lgs.196/03 - tra cui, a mero titolo esemplificativo, il diritto di ottenere la conferma dell'esistenza di dati, la indicazione delle modalità di trattamento, la rettifica o l'integrazione dei dati, la cancellazione ed il diritto di opporsi in tutto od in parte al relativo utilizzo - potrà accedere alle suddette banche dati rivolgendosi al Responsabile del trattamento dei dati contenuti nell'archivio sopraindicato presso la Redazione di Le Scienze, Via Cristoforo Colombo, 90, 00147 Roma.

ABBONAMENTI E ARRETRATI
SOMEDIA S.p.A.
Casella Postale 10055 - 20111 Milano
Abbonamenti: abbonamentiscienze@somedia.it
Arretrati e prodotti opzionali: lescienzevendite@somedia.it
Tel. 199.78.72.78 (0864.256266 per chi chiama da telefoni cellulari. Il costo massimo della telefonata da rete fissa è di 14,37 cent di euro al minuto più 6,24 cent di euro di scatto alla risposta (iva inclusa). Per chiamate da rete mobile il costo massimo della chiamata è di 48,4 cent di euro al minuto più 15,62 cent di euro di scatto alla risposta (iva inclusa). Fax 02 26681991.
Abbonamenti aziendali e servizio grandi clienti
Tel. 02 83432422; fax 02 70648237;
mail grandiclienti@somedia.it

Italia

abb. annuale	€ 39,00
abb. biennale	€ 75,00
abb. triennale	€ 99,00
copia arretrata	€ 9,00

Estero

abb. annuale Europa	€ 52,00
abb annuale Resto del Mondo	€ 79,00

Accertamento diffusione stampa certificato n. 8286 del 3/2/2017

LEGGERE, APPROFONDIRE, COLLEZIONARE.

Le Scienze

www.lescienze.it

edizione italiana di Scientific American

ABBONATI SUBITO

CON QUESTA PROPOSTA SUPERVANTAGGIOSA.

PIÙ AUMENTA LA DURATA, PIÙ RISPARMI!

DURATA	PREZZO INTERO	PREZZO PER TE
1 ANNO 12 numeri	~~€54,00~~	€39,00
2 ANNI 24 numeri	~~€108,00~~	€75,00
3 ANNI 36 numeri	~~€162,00~~	€99,00

Solo con l'abbonamento puoi consultare su
www.lescienze.it il ricchissimo archivio dal 1968 ad oggi.

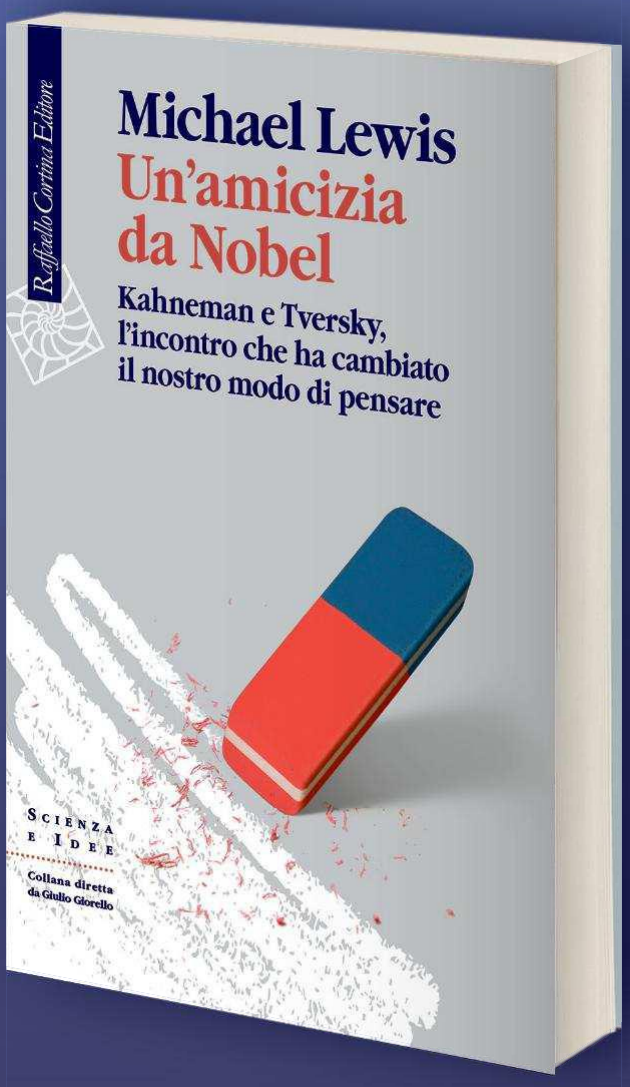
APPROFITTA DI QUESTA OFFERTA SPECIALE!

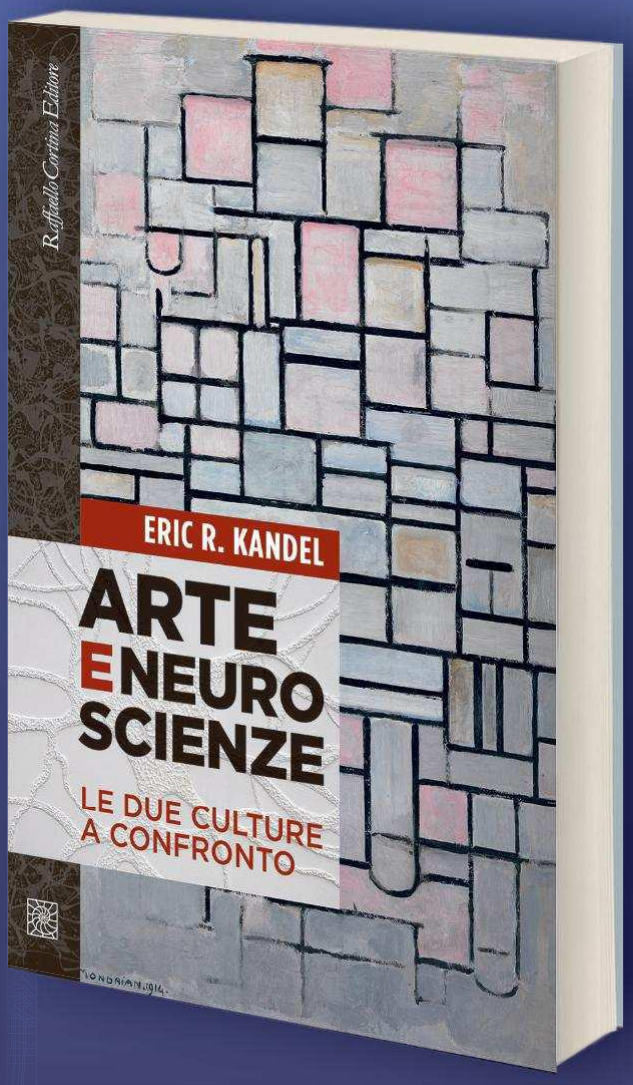
Spedisci la cartolina che trovi nella rivista oppure trasmettila via fax al n. 02.70.64.82.38
Se preferisci collegati al sito www.ilmioabbonamento.it o telefona al numero 199.78.72.78*

*0864.25.62.66 per chi chiama da telefoni non abilitati o cellulari. Il costo massimo della telefonata da rete fissa è di 14,49 cent di euro al minuto + 6,29 cent di euro di scatto alla risposta (iva inclusa). Per chiamate da rete mobile il costo massimo della chiamata è di 48,8 cent di euro al minuto + 15,75 cent di euro di scatto all a risposta (iva inclusa).

La storia di una collaborazione avvincente tra due menti d'eccezione

I capolavori dell'arte moderna sotto la lente del premio Nobel Eric Kandel





Raffaello Cortina Editore